

# Überwachung von Tragwerken mit Profilsclannern

## Monitoring of supporting structures with profile laser scanning

Zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation von Florian Johannes Schill aus Schwäbisch Hall

Tag der Einreichung: 08.11.2017, Tag der Prüfung: 16.02.2018

Darmstadt 2018 — D 17

1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Andreas Eichhorn
2. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Hans Neuner (TU Wien)
3. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Jens Schneider



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Institut für Geodäsie -  
Geodätische Messsysteme und Sensorik

Fachbereich Bau- und  
Umweltingenieurwissenschaften



Überwachung von Tragwerken mit Profilsclannern  
Monitoring of supporting structures with profile laser scanning

Genehmigte Dissertation von Florian Johannes Schill aus Schwäbisch Hall  
Dissertationsort: Darmstadt, Technische Universität Darmstadt

1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Andreas Eichhorn
2. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Hans Neuner (TU Wien)
3. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Jens Schneider

Tag der Einreichung: 08.11.2017

Tag der Prüfung: 16.02.2018

Darmstadt 2018 — D 17

Bitte zitieren Sie dieses Dokument als:

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-72679

URI: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/7267>

Dieses Dokument wird bereitgestellt von tuprints,

E-Publishing-Service der TU Darmstadt

<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de>

[tuprints@ulb.tu-darmstadt.de](mailto:tuprints@ulb.tu-darmstadt.de)

Jahr der Veröffentlichung auf TUprints: 2018



Die Veröffentlichung steht unter folgender Creative Commons Lizenz:

Namensnennung – Keine kommerzielle Nutzung – Keine Bearbeitung 4.0 International

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

---

## Zusammenfassung

---

Die Überwachung der Tragwerke von Ingenieurbauwerken ist ein wichtiger Grundstein zur Gewährleistung einer sicheren technischen Infrastruktur. Aufgrund der alternden Infrastruktur und der vielfach gesteigerten Belastung nimmt dabei sowohl die Anzahl an zu überwachenden Ingenieurbauwerken als auch der Umfang der jeweiligen Überwachungsaufgaben zu. Um die daraus entstehenden Herausforderungen zu bewältigen, ergibt sich der Bedarf nach einer effizienten Erfassung von Deformationen unter dynamischer Belastung.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Realisierung eines Monitoringsystems zur Überwachung von Tragwerken auf Basis eines Profilsanners. Die berührungslose Erfassung mit Profilsannern verringert zunächst den Aufwand für Personal und Instrumentierung im Vergleich zu klassischer, für die Überwachung von Tragwerken eingesetzter Sensorik und ermöglicht zusätzlich das Anmessen von nicht zugänglichen Stellen. Durch die Verfügbarkeit von Informationen entlang eines ganzen Tragwerkprofils können darüber hinaus Analysen flexibel an variierende Fragestellungen angepasst werden.

Mit einer Messrate von mindestens 50 Hz können typische Tragwerksdeformationen zuverlässig erfasst und ausreichend Datenmaterial zur Charakterisierung der Deformationsprozesse gesammelt werden.

Für den Einsatz von Profilsannern zur Überwachung von Tragwerken wurde neben instrumentenspezifischen Adaptionen, wie der Sensorbefestigung, einer Anzeilvorrichtung sowie einer autonomen Stromversorgung, ein universell einsetzbares Prozessierungs- und Auswertekonzept entwickelt.

Diese sogenannte raumzeitliche Prozessierung kann durch den Einsatz der diskreten Wavelet-Transformation nahezu vollständig automatisiert werden. Dadurch wird die Analyse der Messreihen in der Orts-Frequenz- bzw. Zeit-Frequenz-Ebene ermöglicht und so die Lokalisierung und Charakterisierung von Unstetigkeitsstellen durchgeführt. Die zentralen Bestandteile der raumzeitlichen Prozessierung sind dabei:

- die automatische Korrektur von Fehlmessungen,
- die strukturorientierte Segmentierung und Approximation der Messprofile,
- die Unsicherheitsbestimmung in Zeitreihen.

Obwohl das Messrauschen eines Profilsanners im Vergleich zu traditionell für die Überwachung von Tragwerken eingesetzter Sensorik, wie z. B. induktiven Wegaufnehmern, um ein Vielfaches höher ist, gelingt durch den Einsatz der raumzeitlichen Prozessierung die Ableitung nahezu vergleichbarer Ergebnisse für die Deformationssignale.

Insgesamt gesehen wird somit ein automatisierter und effizienter Auswerteprozess realisiert, der durch den Einsatz der diskreten Wavelet-Transformation Ausreißer erkennen und eliminieren bzw. kompensieren kann. Neben der Ergebnisableitung ist so auch eine Qualitätsbewertung unter umfassender Einbeziehung der redundanten Informationen als in situ Unsicherheitsbestimmung möglich.

Durch den Einsatz der raumzeitlichen Prozessierung wird an verschiedenen Beispielen das gesamte Anwendungsspektrum von Profilsannern für die Überwachung von Tragwerken gezeigt. Diese reichen von Eisenbahnbrücken bis hin zu Windenergieanlagen und decken den typischerweise bei Tragwerken auftretenden Frequenzbereich bis 10 Hz ab.

Durch die nahezu kontinuierliche Erfassung der Tragwerksoberfläche können direkt Deformationsprofile entlang der Tragwerksstruktur abgeleitet werden. Damit wird u. a. die Aufdeckung von Unstetigkeitsstellen der Tragwerksstruktur, wie Risse oder Brüche sowie die Reduktion der Abhängigkeit von Vorwissen für die Messplanung ermöglicht.

---

## Abstract

---

The monitoring of supporting structures is an important cornerstone for ensuring a solid technical infrastructure. Due to the ageing of supporting structures and the often increased mechanical load, the number of engineering structures to be monitored as well as the extent of the respective monitoring tasks are increasing. In order to cope with the resulting challenges, there is a need for an efficient acquisition of deformations under dynamic load.

The aim of this thesis is the realisation of a monitoring system for supporting structures on the basis of a profile laser scanner. The contact-free acquisition method of profile laser scanners reduces the expense for personnel and instrumentation compared to conventional sensors used for the monitoring of civil engineering structures. It furthermore enables the measurement of non-accessible areas of the monitored supporting structures. In addition, the availability of information along an entire structural profile can be used to flexibly deal with a wide variety of problems.

With a measurement rate of at least 50 Hz, typical structural deformation signals can be recorded and sufficient data can be collected to characterize the underlying deformation processes dependably.

In addition to instrument-specific adaptations such as the sensor mounting, a special targeting accessory and an autonomous power supply, a universally applicable processing and evaluation concept was developed for the use of a profile laser scanner for the monitoring of supporting structures.

The established processing and evaluation concept is based on the spatiotemporal resolution of the measurement data and is nearly automated due to the use of the wavelet transform. This enables the analysis of the measurement series in the spatial-frequency- or time-frequency-domain and thus performs the localization and characterization of discontinuities. The central components of the spatiotemporal processing scheme are:

- automatic correction of erroneous measurements,
- the structure-oriented segmentation and approximation of the measurement profiles,
- the determination of the uncertainty of the measured time series.

Although the measurement noise of a profile laser scanner is higher in comparison to conventional sensors used for the monitoring of civil engineering structures, such as inductive displacement sensors, the use of the spatiotemporal processing scheme results in the derivation of comparable deformation signals.

Overall, an automated and efficient evaluation process is thus realized, which can detect and eliminate outliers by using the discrete wavelet transform. In addition to the derivation of displacements, a quality assessment with comprehensive integration of the redundant information is possible as an in situ uncertainty determination.

Various examples of the use of the spatiotemporal processing scheme show different applications of profile laser scanners for the monitoring of supporting structures. These range from railway bridges to wind power plants and cover the typical frequency bandwidth up to 10 Hz which occur at supporting structures. Based on the almost continuous acquisition of the supporting structures surface, deformation profiles can be derived directly. This enables, among other things, the detection of discontinuities of the supporting structure, such as cracks or fractures as well as the reduction of the dependence on previous knowledge for measurement planning.

---

---

## Inhaltsverzeichnis

---

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Stand der Forschung . . . . .	4
1.2	Aufbau der Arbeit . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Messsystem</b>	<b>7</b>
2.1	Profilscanner . . . . .	7
2.1.1	Konstruktive Adaptionen für die Überwachung von Tragwerken . . . . .	9
2.1.2	Lasermesssystem . . . . .	11
2.1.3	Ablenkeinheit . . . . .	14
2.1.4	Synchronisation . . . . .	16
2.1.5	Software . . . . .	17
2.2	Eigenschaften von Profilsannermessungen . . . . .	19
2.2.1	Messprofil . . . . .	19
2.2.2	Profilmesspunkt . . . . .	21
2.3	Unsicherheit von Profilsannermessungen . . . . .	25
2.3.1	Unsicherheitsbestimmung bei 3D-TLS . . . . .	25
2.3.2	Bestimmung der Koordinatenunsicherheit bei Profilsannern . . . . .	30
<b>3</b>	<b>Raumzeitliche Prozessierung von Profilsannermessungen</b>	<b>33</b>
3.1	Automatische Analyse von Messprofilen . . . . .	33
3.1.1	Wavelet-Transformation . . . . .	35
3.1.2	Anforderungen an den Analysealgorithmus . . . . .	37
3.1.3	Realisierung eines Analysealgorithmus . . . . .	38
3.1.4	Einsatz zur Analyse von Messprofilen . . . . .	55
3.2	Räumliche Prozessierung . . . . .	61
3.2.1	Approximation von Tragwerksprofilen durch räumliche Klassenbildung . . . . .	61
3.2.2	Approximation von Tragwerksprofilen mit B-Spline-Funktionen . . . . .	64
3.2.3	Approximation von Tragwerksprofilen mit Wavelets . . . . .	71
3.2.4	Zusammenfassung und Vergleich der Approximationsmethoden . . . . .	74
3.3	Zeitliche Prozessierung . . . . .	76
3.3.1	Anforderungen an den Analysealgorithmus für den Einsatz bei Zeitreihen . . . . .	76
3.3.2	Realisierung des Analysealgorithmus zum Einsatz bei Zeitreihen . . . . .	77
3.3.3	Einsatz zur Analyse von Zeitreihen . . . . .	81
3.3.4	Unsicherheitsbestimmung in Zeitreihen von approximierten Tragwerkspunkten . . . . .	83
3.4	Fazit . . . . .	88
<b>4</b>	<b>Beispiele für die Überwachung von Tragwerken mit Profilsannern</b>	<b>91</b>
4.1	Einfeldträgerbrücke über die Flanitz bei Klingenbrunn . . . . .	93
4.1.1	Messdaten . . . . .	95
4.1.2	Bestimmung der Unsicherheit der approximierten Tragwerkspunkte . . . . .	97
4.1.3	Vergleich mit einem induktiven Wegaufnehmer . . . . .	100
4.1.4	Raumzeitliche Bestimmung der Vertikalverformung . . . . .	102
4.1.5	Bestimmung der Horizontalverformung der Hauptträger . . . . .	108
4.2	Belastungsversuch am Bogen einer historischen Gewölbebrücke über die Aller . . . . .	111
4.2.1	Messdaten . . . . .	112
4.2.2	Auswertung der Vertikalverformung in der Konfiguration 1 . . . . .	114

---

4.2.3	Auswertung der Vertikalverformung in der Konfiguration 2 . . . . .	116
4.3	ETA Fabrik: Die energieeffiziente Modellfabrik der Zukunft (TU Darmstadt) . . . . .	119
4.3.1	Messdaten . . . . .	120
4.3.2	Auswertung der Vertikal- und Horizontalverformung . . . . .	122
4.4	Trogbrücke über die Aller . . . . .	124
4.4.1	Vergleich der Prozessierungsmethoden . . . . .	124
4.4.2	Analyse von dynamischen Verformungsanteilen . . . . .	126
4.5	Windenergieanlage Tacke TW600 (Neutscher Höhe) . . . . .	131
4.5.1	Messdaten . . . . .	132
4.5.2	Raumzeitliche Bestimmung der Horizontalverformung . . . . .	133
<b>5</b>	<b>Fazit und Ausblick</b>	<b>137</b>
	<b>Literatur</b>	<b>141</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>150</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>151</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>153</b>
A.1	Systematische Messabweichungen beim Einsatz zur Überwachung von Tragwerken . . . . .	153
A.1.1	Bekannte Systematische Messabweichungen . . . . .	154
A.1.2	Unbekannte systematische Messabweichungen . . . . .	155
A.2	Filterung mit dem Haar-Wavelet . . . . .	157
A.3	Bestimmung lokaler Maxima . . . . .	161
A.4	Regressionsanalyse . . . . .	162

---

## 1 Einleitung

---

Eine grundsätzliche Zielstellung der geodätischen Überwachung ist die Erfassung geometrischer Objektveränderungen unter dem Einfluss von Belastungen. Dies schließt neben der rein messtechnischen Erfassung auch die Auswertung und Interpretation der auftretenden Deformationen mit ein und bildet laut [Heu+13] einen der wesentlichen Aufgabenbereiche der Ingenieurgeodäsie.

Insbesondere der Überwachung von Tragwerken kommt dabei eine große Bedeutung zu. Da ein Tragwerk als Gesamtsystem aller tragenden Elemente eines Bauwerkes bzw. Ingenieurbauwerkes maßgeblich für dessen Standsicherheit verantwortlich ist, bedarf es aufgrund der damit einhergehenden Sicherheitsrelevanz einer regelmäßigen Überwachung, siehe z. B. [DIN99].

Konkret wird unter der Überwachung eines Tragwerks die Beurteilung seines Zustandes auf Basis der messtechnischen Erfassung geometrischer Veränderungen unter einwirkenden Belastungen verstanden. In diesem Zusammenhang existieren unterschiedliche Gründe für die Durchführung von Überwachungsmessungen:

- Die Erfassung der alternden Infrastruktur zur Ermittlung des Sanierungsbedarfs (z. B. durch Verschleiß, Ermüdung, Korrosion) und damit die Beurteilung der Restnutzungsdauer, bzw.
- eine geplante Weiternutzung über die Entwurfslebensdauer hinaus oder
- eine geplante Änderung der Nutzungsbedingungen.

Grundsätzlich ist die korrekte Interpretation der geometrischen Veränderungen für eine sachgerechte Zustandsbeurteilung des Tragwerks notwendig, was wiederum nur mithilfe einer genauen Analyse der Belastungseinflüsse gelingen kann (kausale Betrachtungsweise).

Tragwerke können dabei in vielfältiger Weise Belastungen ausgesetzt sein, z. B. andauernd aufgrund des Eigengewichts oder zeitlich variierend aufgrund der Nutzlast, dem Winddruck, aber auch außergewöhnlichen Ereignissen wie Erdbeben oder einem Fahrzeuganprall. Durch diese Belastungen können Schädigungsprozesse entstehen, die zu einer Beeinträchtigung der Tragfähigkeit oder Gebrauchstauglichkeit der Tragwerke führen können. Vielfach existiert eine gesteigerte Belastung der Tragwerke. So werden z. B. Brückenbauwerke durch Verkehrslasten beansprucht, die sowohl in ihrer Häufigkeit als auch Größenordnung selten den Annahmen zum Zeitpunkt der Errichtung entsprechen, siehe [Ahr10].

Prinzipiell lassen sich die auf das Tragwerk einwirkenden Belastungen nach ihrem zeitlichen Verlauf folgendermaßen unterscheiden [Eic05]:

### 1. Statische Belastungen

Diese sind entweder zeitlich konstant oder vollziehen sich so langsam, dass die zeitlichen Ableitungen erster und zweiter (Trägheitsglieder) Ordnung der Objektreaktion bei der Modellierung vernachlässigt werden können. Statisch belastete Tragwerke befinden sich daher in einer Gleichgewichtslage und somit hinreichend in Ruhe.

### 2. Dynamische Belastungen

Wird ein Tragwerk durch dynamische Belastungen, wie Stoß- und Bremskräfte, maschineninduzierte Schwingungen oder Wind- bzw. Erdbebenlasten beansprucht, sind die o. g. Vernachlässigungen nicht zulässig, da die Belastungen zeitliche Variationen aufweisen. Da sich das Tragwerk in Bewegung befindet, muss die Zeit explizit bei der Erfassung der Deformation berücksichtigt werden.

---

Je nachdem, ob die Krafteinträge am Tragwerk deterministisch oder stochastisch erfolgen, kann nach [Wan17] die Einteilung der dynamischen Belastungen noch weiter verfeinert werden:

- Deterministische dynamische Belastungen  
Bei deterministischen Belastungen lässt sich der Wert der Last für jeden Zeitpunkt mit hinreichender Genauigkeit angeben, d. h. der zeitliche Verlauf ist reproduzierbar.
- Stochastische dynamische Belastungen  
Bei stochastischen Belastungen weist der Wert der Last zu einem bestimmten Zeitpunkt eine starke Streuung auf. Somit lässt sich nur eine Wahrscheinlichkeit angeben, mit der Wert der Last in einem bestimmten Intervall liegt, d. h. der zeitliche Verlauf ist nicht reproduzierbar.

Da es sich bei Ingenieurbauwerken oft um schwingungsfähige Systeme handelt und der überwiegende Anteil aller Belastungseinflüsse einen dynamischen Charakter hat, liegt der Schwerpunkt entsprechender Überwachungsmessungen auf der Erfassung zeitlich variabler Tragwerksdeformationen. Diese Deformationen lassen sich nur mit einer Sensorik erfassen, die zeitlich hochaufgelöste Messwerte liefert. Beispiele für typischerweise zur Überwachung von Tragwerken eingesetzte Sensoren sind induktive Wegaufnehmer, Beschleunigungsmesser und Dehnungsmessstreifen. Diese müssen direkt am Tragwerk adaptiert werden und liefern somit Zeitreihen für diskrete Punkte der Tragwerksoberfläche.

Um die geometrischen Veränderungen der Tragwerksoberfläche auch räumlich in geeigneter Weise auflösen zu können, wird empfohlen, eine Vielzahl solcher Sensoren am Bauwerk anzubringen, siehe [BZ14, S. 106]. Zur Identifizierung von modalen Größen des Tragwerks, wie Eigenfrequenzen und -formen, ist es zudem wichtig, die optimale Platzierung der Sensoren hinsichtlich der angeregten Tragwerksoberfläche bereits im Voraus zu kennen.

Zur Gewährleistung einer möglichst idealen Platzierung und einer gleichzeitigen Reduktion des Aufwands für Montage und Messung wird Vorwissen über das Deformationsverhalten des Tragwerks benötigt. Stand der Technik sind dafür numerische Simulationen des Tragwerksverhaltens unter möglichst realistischen Belastungszuständen, um so u. a. die folgenden Aspekte zu klären:

- Die konkrete Platzierung der Sensoren.
- Die Anzahl an Sensoren in Abhängigkeit der gewünschten räumlichen Auflösung.
- Die Wahl der Sensorik in Abhängigkeit der zeitlichen und spektralen Auflösung.

Die Qualität des aus diesen numerischen Simulationen generierten Vorwissens hängt entscheidend von den verwendeten Modellannahmen ab. Daher sollten die numerischen Modelle das gebaute Tragwerk und vor allem dessen Zustand möglichst realitätsnah abbilden. Probleme bei der Tragwerksmodellierung können somit aus nicht bekannten Unterschieden zwischen projektiertem und gebautem Tragwerk bzw. falschen Annahmen über den gegenwärtige Tragwerkszustand resultieren, was sich auch in den Materialparametern zeigen kann, die nicht den Planungsvorgaben entsprechen, siehe u. a. [Bec+14]. Beide Probleme lassen sich nur durch die messtechnische Erfassung des Tragwerks und seiner Deformation unter Belastung lösen. Kommen darüber hinaus wahrscheinlichkeitstheoretische Ansätze zum Einsatz, wie es bei der Simulation von stochastischen dynamischen Belastungen (z. B. der Böigkeit des Windes) der Fall ist, müssen Messdaten in beträchtlichem Umfang erhoben werden, damit diese Simulationen zu realitätsnahem Vorwissen führen, siehe [BZ14, S. 55].

Im Idealfall sollte die messtechnische Erfassung als Basis einer Tragwerksüberwachung daher sehr effizient und mit hoher Flexibilität hinsichtlich der räumlichen und zeitlichen Auflösung möglich sein.

Ingenieurbauwerke, bei denen für Überwachungsaufgaben maßgebliche dynamische Belastungen auftreten, sind beispielsweise Brücken und Windenergieanlagen. Während bei Brücken durch die Verkehrslast vorrangig deterministische Belastungen auftreten, werden Windenergieanlagen sowohl deterministisch (durch die Rotordrehung) als auch stochastisch (durch die Böigkeit des Windes) beansprucht.



---

Beide Bauwerkstypen haben eine hohe volkswirtschaftliche Relevanz und stellen allein durch ihre Anzahl eine große Herausforderung für die Überwachung ihrer Standsicherheit bzw. Gebrauchstauglichkeit dar:

- Allein von den mehr als 25.000 Eisenbahnbrücken mit einem Durchschnittsalter von 57 Jahren sind mehrere Tausend Brücken in einem bedenklichen Zustand oder sogar nicht mehr sanierungsfähig (siehe z. B. für Hessen [Mai+17] bzw. [Bun17]). Ein ähnliches Bild zeigt sich auch bei den Brücken der Bundesfernstraßen: von knapp 40.000 Brücken werden 12 % in die Kategorien „nicht ausreichend“ oder „ungenügend“ eingestuft, siehe [ADA13] und [BMV16].
- Die Serienproduktion von Windenergieanlagen in Deutschland begann Anfang der Neunzigerjahre. Heute gibt es mehr als 27.000 Windenergieanlagen in Deutschland. Bei einer typischen Entwurfslebensdauer von 20 Jahren erreichen in den nächsten Jahren immer mehr dieser Anlagen ihre geplante Nutzungsdauer und bedürfen für einen möglichen Weiterbetrieb deshalb entsprechende Nachweise, siehe [Lac14].

Neben der größer werdenden Anzahl der zu überwachenden Ingenieurbauwerke nimmt an vielen Stellen auch deren Komplexität zu, sodass sich hohe Anforderungen hinsichtlich der Entwicklung von effizienten Konzepten für Überwachungsmessungen ergeben.

Als Grundlage eines solchen effizienten Überwachungskonzeptes eignen sich insbesondere berührungslose Messsysteme, da sich mit ihnen der Aufwand für Personal und Instrumentierung am Bauwerk entscheidend reduzieren lässt. Überdies wird der Betrieb nicht beeinträchtigt und eine Beschädigung der Bauwerksoberfläche durch die Befestigung von Sensoren, wie z. B. Dehnungsmessstreifen, vermieden.

Ein solches berührungsloses Messsystem, mit dem sich unabhängig vom Umgebungslicht die Bauwerks-oberfläche mit einer hohen räumlichen Auflösung erfassen lässt, ist das terrestrische Laserscanning (TLS), siehe [Wuj16]. Zur Erfassung von Tragwerksdeformationen, die durch dynamische Belastungen des Bauwerks entstehen, müssen jedoch spezielle TLS eingesetzt werden, die lediglich Profile der Tragwerks-oberfläche erfassen, dafür aber mit einer hohen zeitlichen Auflösung. Solche Profils Scanner werden aufgrund der Möglichkeit, die Kinematik eines Tragwerkes zu erfassen, auch als kinematische terrestrische Laserscanner (kTLS) bezeichnet, siehe u. a. [PVK08].

Entsprechend diesen Ausführungen ist die Zielstellung dieser Arbeit die Realisierung eines Monitoringsystems zur berührungslosen Überwachung von Tragwerken, aufbauend auf dem Profils Scanner Z+F Profiler 9012. Dabei soll gezeigt werden, dass Profils Scanner das Potenzial besitzen, die Nachteile berührender Messsysteme auszugleichen, um somit bisherige Monitoringkonzepte zu ergänzen und zu erweitern. Mit der wiederholten profilhaften Erfassung des Tragwerkes gelingt eine zeitliche und räumliche Auflösung, mit der die Tragwerkscharakteristik nahezu kontinuierlich innerhalb eines Messprofils erfasst werden kann. Darüber hinaus lassen sich die so abgeleiteten Ergebnisse sinnvoll mit der durch weitere Sensorik an diskreten Punkten gewonnenen Messinformation verknüpfen bzw. zur Verknüpfung dieser diskreten Messstellen nutzen.

Zur Umsetzung dieser Zielstellung muss neben konstruktiven Adaptionen für den autonomen Einsatz auch ein Konzept zur Datenaufbereitung und Auswertung sowie zur Unsicherheitsbestimmung entwickelt werden. Im Rahmen der Datenaufbereitung sollen Fehlmessungen unter Erhaltung der maximalen Messinformation erkannt und eliminiert werden. Aufgrund der enormen Datenmengen, die von TLS erzeugt werden, kann diese Umsetzung sinnvollerweise nur automatisch erfolgen.

Durch die so erreichbare effiziente und nahezu raumkontinuierliche profilweise Erfassung kann der Bedarf nach Vorwissen über die Tragwerksstruktur für die Messplanung reduziert werden, da auch im Nachhinein ausgewählt werden kann, an welcher Position im Messprofil Ergebnisse abgeleitet werden sollen. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, aufgrund der effizienten Datenakquisition gezielt Vorwissen in Form von Messdaten zu generieren, z. B. für die Modellierung stochastischer Größen oder für die Verifizierung von Tragwerksmodellen.



---

## 1.1 Stand der Forschung

---

Aufgrund der Bedeutung, die der Überwachung von Tragwerken in der Ingenieurgeodäsie zukommt, existiert eine große Auswahl entsprechender Literatur. Ein Überblick findet sich in [Heu+13, S. 625 ff.]. Dort werden ausgewählte Messprojekte an Ingenieurbauwerken vorgestellt. Ergänzend dazu konzentrieren sich die folgenden Ausführungen auf aktuelle Publikationen, die sich mit dem Einsatz von Profilsclannern bei der Überwachung von Bauwerken unter dynamischer Belastung beschäftigen.

Die dabei diskutierten Themen reichen von der Modellierung der Profilsclannermessungen und deren Unsicherheit über die Ableitung von Strukturparametern bis hin zum konkreten Einsatz und der Kombination mit traditioneller Sensorik der Tragwerksüberwachung.

Obwohl Profilsclanner die Tragwerksoberflächen mit einer hohen räumlichen Auflösung erfassen, ist für die Interpretation der Deformation oft eine parametrisierte Darstellung der Oberfläche sinnvoll. In [NSN13], [SN15], [HN16] und [BAN16] werden **Modellierungsansätze für Profilsclannermessungen** diskutiert, die auf B-Splines basieren.

Weitere Modellierungsansätze, insbesondere für 3D-TLS, finden sich in [NHK16] und [Wun+16]. Meist lassen sich entsprechende Ansätze für Punktwolken von 3D-TLS auch für die Verwendung bei Profilsclannern adaptieren.

Ein weiterer häufig diskutierter Aspekt ist die Ableitung von realistischen **Unsicherheitsangaben für Profilsclannermessungen**. In [Kut+10] und [AK13] wird die Modellierung der Unsicherheit von TLS-Beobachtungen mittels Monte-Carlo-Simulationen untersucht, wobei die Messungen an einer Spannbetonbrücke die numerische Grundlage bilden.

Weitere Untersuchungen zur Unsicherheit beim kinematischen Einsatz von TLS werden in [Ven+10] im Rahmen von Laboruntersuchungen auf der Präzisions-High-Speed-Linearmessbahn (PHIL) des Geodätischen Instituts der Universität Karlsruhe (siehe [Hen06]) durchgeführt. Untersucht wurde ein Z+F Imager 5006 im Profilmodus. Durch die Kombination der Linearmessbahn mit einem Lasertracker als Referenzmesssystem können für den untersuchten TLS stochastische Unsicherheiten angegeben werden.

Ein neuerer Ansatz verwendet zur Ableitung von Koordinatenunsicherheiten den Zusammenhang zwischen Intensität und Messunsicherheit eines 3D-TLS, siehe [Wuj+17].

Die Identifikation von **Strukturparametern** ist ein wichtiger Teil der Zustandsüberwachung von Tragwerken. Dementsprechend wird in [NSN14], [SNN13] und [Sch+13] die Ableitung der Dehnung aus Profilsclannermessungen unter Verwendung Künstlicher Neuronaler Netzwerke (KNN) untersucht.

Auch die Bestimmung modaler Kenngrößen wie Eigenfrequenzen und -formen aus Profilsclannermessungen ist möglich, siehe [SE16] und [HKN05]. Dabei konnte durch die nahezu raumkontinuierliche Erfassung der Tragwerksoberfläche die Bestimmung dieser Parameter an einem Großteil des Tragwerks durchgeführt werden.

Weitere Publikationen befassen sich mit dem **konkreten Einsatz von TLS im Profilmodus bzw. Profilsclannern** zur Erfassung von zeitlich veränderlichen Deformationen, wobei auch der Vergleich mit traditioneller Sensorik diskutiert wird. Dabei werden zwei Typen von Ingenieurbauwerken untersucht: Brücken und Windenergieanlagen.

### Brücken

Im Rahmen des Projektes „Life-Cycle Bridge Engineering – Integriertes Brückenmonitoring mit Laser-scanning“ untersuchte das Geodätische Institut der Universität Hannover zusammen mit dem Institut für Massivbau der Universität Hannover eine Mehrfeldbrücke der B443. Das Ziel dieser Zusammenarbeit war die Erfassung statischer und dynamischer Auswirkungen des Schwerlastverkehrs auf Spannbetonbrücken.

---

Parallel zu klassischen Sensoren der Baumesstechnik, wie Dehnungsmessstreifen und optische Sensoren, wurden u. a. auch Messungen mit einem TLS im Profilmodus durchgeführt, siehe [Lie+11]. Die erzielten Ergebnisse deckten sich auf wenige zehntel Millimetern mit den berechneten theoretischen Durchbiegungen.

Im Jahr 2016 fand ebenfalls unter der Leitung des Instituts für Massivbau der Universität Hannover ein Belastungsversuch an einer historischen Gewölbebrücke statt, siehe [Aut18]. Dabei kam neben mehreren 3D-TLS auch ein Z+F Profiler 9012 des Instituts für Geodäsie der TU Darmstadt zum Einsatz. In [Wuj+18] werden Auswertungen der TLS präsentiert und miteinander verglichen. Die Abweichungen der Ergebnisse der einzelnen Messsysteme an ausgewählten Positionen des Tragwerks liegen dabei im Bereich weniger zehntel Millimeter.

In [SE17] liegt der Schwerpunkt auf der räumlichen und zeitlichen Prozessierung von Profilsclannermessungen an einer Eisenbahnbrücke. Es werden erste Ergebnisse einer Auswertestrategie für Messungen an stark strukturierten Tragwerksflächen vorgestellt. Durch den Vergleich mit Messungen eines induktiven Wegaufnehmers konnten die erzielten Ergebnisse verifiziert werden.

Auch in [Bec+16] wird die Überwachung von Eisenbahnbrücken thematisiert. Der Schwerpunkt liegt auf dem Einsatz eines terrestrischen Mikrowelleninterferometers zur Identifikation der Strukturparameter Eigenfrequenz und Dämpfung von Eisenbahnbrücken. Die erzielten Ergebnisse werden darüber hinaus mit den Messungen eines Profilsclanners verglichen, wobei Abweichungen der jeweils bestimmten Maximalverformungen von bis zu 0,4 mm auftreten. Diese Abweichungen haben ihren Ursprung vermutlich in der Horizontalverformung der Brücke, da aufgrund des Standpunktes und des Messprinzips des Mikrowelleninterferometers eine Trennung zwischen Horizontal- und Vertikalverformung nicht möglich war.

### **Windenergieanlagen**

In [HNK05] und [Hes+06] wird die Überwachung einer Windenergieanlage mit geodätischen Messmethoden thematisiert. Dabei kommt neben Neigungsmessern, GPS und einem Tachymeter auch ein Z+F Imager 5003 im Profilmodus zum Einsatz. Als Ergebnis der Untersuchungen konnten die erste Eigenfrequenz und die Rotorfrequenz im Amplitudenspektrum aufgedeckt werden.

In [SE16] wird die Überwachung von zwei Windenergieanlagen vorgestellt. Es gelingt die Identifikation der jeweiligen Eigenfrequenz sowie weiterer Anregungsfrequenzen aufgrund der Rotordrehung. Durch die nahezu raumkontinuierliche Erfassung der gesamten Türme bis zu einer Höhe von 75 m konnten auch die ersten Eigenformen abgeleitet werden. Aufgrund auftretender Instationaritäten in den Messzeitreihen wird der Einsatz der Wavelet-Transformation sowie die Kombination mit einer Image Assisted Total Station (IATS) vorgeschlagen.

### **Alternative berührungslose Messsysteme**

Neben TLS im Profilmodus bzw. Profilsclannern werden zur Erfassung von Bauwerksdeformationen unter dynamischen Belastungen auch noch die folgenden berührungslos messenden Systeme eingesetzt: terrestrische Mikrowelleninterferometrie (z. B. [Röd11], [NN12]), Videotachymetrie (z. B. [Wal04], [EL15]) und Kamerasysteme für die digitale Bildkorrelation (z. B. [BNL17]).

---

## 1.2 Aufbau der Arbeit

---

Das anschließende zweite Kapitel befasst sich grundlegend mit dem eingesetzten Profils Scanner Z+F Profiler 9012. Für den Einsatz zur Überwachung von Tragwerken sind umfangreiche konstruktive Adaptionen notwendig, auf die zunächst näher eingegangen wird, bevor die wesentlichen Komponenten des Messsystems erläutert werden. Wichtige Punkte sind hierbei u. a. die Rotationsgeschwindigkeit und ihre Stabilität sowie die Charakteristik des Messlasers.

Die mit diesen Komponenten erzeugten Daten (Profils cans) gliedern sich in Messprofile, welche wiederum die Profilmesspunkte enthalten. Ein besonderes Augenmerk wird dabei auf das Verhältnis von Laserspotdurchmesser zu Punktabstand sowie möglichen Zuordnungsproblemen der Winkel- und Distanzmessungen beim Z+F Profiler 9012 gelegt.

Abschließend wird die Unsicherheitsbestimmung für TLS allgemein und im Speziellen für Profils Scanner diskutiert. Dabei bildet ein Rückblick auf bis dato umgesetzte Ansätze die Grundlage für das weitere Vorgehen im Rahmen von Zeitreihenanalysen.

Im dritten Kapitel steht die automatische raumzeitliche Prozessierung der Messdaten im Vordergrund. Dementsprechend gliedert sich das Kapitel in einen räumlichen und einen zeitlichen Prozessierungsteil. Da Tragwerke für die Überwachung mit Profils cannern jedoch oft problematische Strukturen enthalten, wird zunächst eine Analyse der Messprofile als Teil der räumlichen Prozessierung durchgeführt. Dabei werden mittels Wavelet-Transformation Fehlmessungen sowie die Auswirkung problematischer Strukturen erkannt und entsprechend berücksichtigt.

Basierend auf dieser Vorverarbeitung können mit der Kombination aus räumlicher und zeitlicher Prozessierung abgeleitete Tragwerkspunkte erzeugt sowie Unsicherheiten in diesen Zeitreihen bestimmt werden.

Die umfangreichen Beispiele in Kapitel 4 zeigen das gesamte Anwendungsspektrum des Profils canners zur Überwachung von Tragwerken. Dabei werden gezielt Tragwerke betrachtet, die sowohl von der räumlichen Ausdehnung als auch vom Frequenzbereich einen Großteil des Bereichs abdecken, der typischerweise bei Ingenieurbauwerken auftritt.

Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung der Möglichkeiten, die sich durch die raumzeitliche Prozessierung von Profils cannermessungen ergeben, und gibt einen Ausblick auf die zukünftigen Schwerpunkte beim Einsatz von Profils cannern für die Überwachung von Tragwerken.

---

## 2 Messsystem

---

Das in dieser Arbeit untersuchte Messsystem basiert auf dem Z+F Profiler 9012. Dementsprechend beschäftigt sich der erste Abschnitt mit dem grundlegenden Aufbau eines Profilerscanners. Dazu werden zunächst kurz die Funktionsweise und der originäre Einsatzzweck auf Basis der Herstellerangaben beschrieben. Im Anschluss daran wird auf verschiedene konstruktive Adaptionen eingegangen, die zur Realisierung eines Messsystems zur Überwachung von Tragwerken auf Basis eines Profilerscanners erforderlich sind. Darauf aufbauend werden die beiden grundlegenden Komponenten des verwendeten Profilerscanners beschrieben, das Lasermesssystem und die Ablenkeinheit. Weiterführende Erläuterungen zur Synchronisation mittels GPS, zur mitgelieferten Herstellersoftware sowie die Beschreibung des Messdaten-Exports vervollständigen diesen Abschnitt.

Im zweiten Abschnitt werden die Profilerscannermessungen charakterisiert und dabei die Begriffe Messprofil und Profilmesspunkt eingeführt. In diesem Zusammenhang erfolgt der Übergang von den originären Messelementen zu exportierten Daten in Form von abgeleiteten Koordinaten, die im Folgenden als Profilerscannermessungen bezeichnet werden.

Hierbei wird insbesondere auf eine mögliche fehlerhafte Zuordnung von Distanz- und Winkelmesswerten eingegangen und ein Lösungsvorschlag zur Detektion und Korrektur der entsprechenden Winkelmesswerte vorgestellt.

Im dritten Abschnitt werden die Fragen erörtert, für welche Elemente in einem Profilerscan Unsicherheiten quantifiziert und mit welcher Methodik diese Unsicherheiten bestimmt und verifiziert werden können. Beim Einsatz von Profilerscannern in der Tragwerksüberwachung kann die epochenweise Erfassung von sich hinreichend in Ruhe befindlichen Tragwerken auf eine nahezu zeitkontinuierliche Erfassung erweitert werden. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, die Unsicherheit von Profilerscannermessungen im Kontext von räumlichen und zeitlichen Analysen zu betrachten. Diese Analysen müssen überdies in der Lage sein, adaptiv auf variierende Objekt- und Umgebungseinflüsse zu reagieren.

---

### 2.1 Profilerscanner

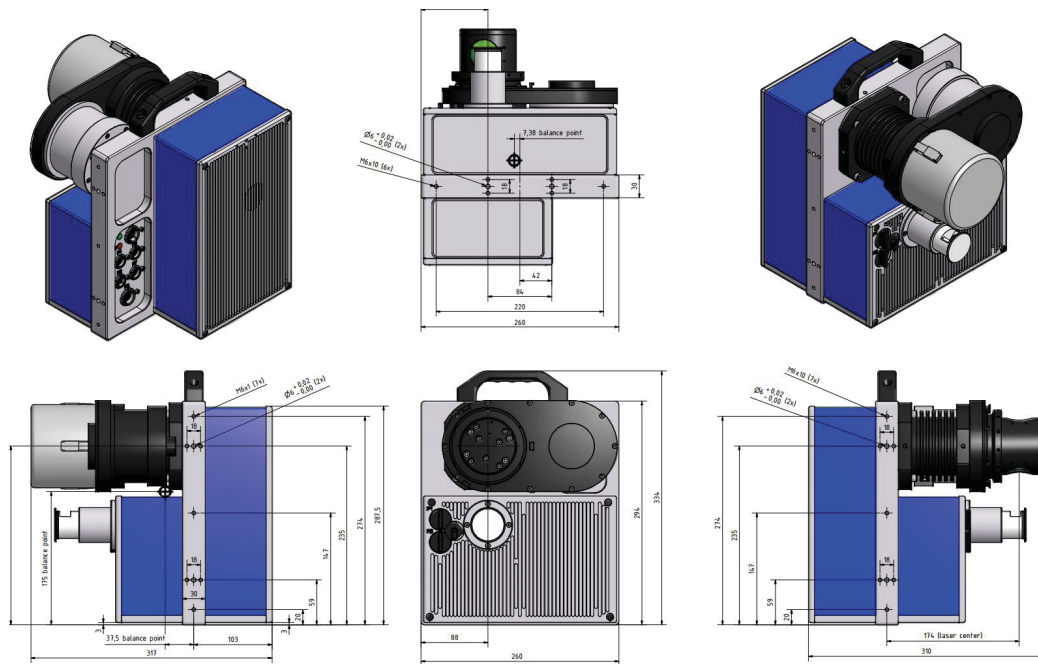
---

Profilscanner werden grundsätzlich in zwei Kategorien unterschieden: Low Cost und High End Systeme, wobei das Haupteinsatzgebiet der Systeme beider Kategorien mobile Plattformen sind. Low Cost Systeme finden beispielsweise Anwendung in der Roboternavigation, High End Profilerscanner, wie der Z+F Profiler 9012, dagegen in Mobile Mapping Systemen. Für beide Kategorien wurde der Anwendungsfall, bei dem sich der Profilerscanner in Ruhe befindet und sich das Messobjekt bewegt, kaum untersucht.

Der in dieser Arbeit verwendete Profilerscanner ist ein phasenbasierter Zoller+Fröhlich Profiler 9012, siehe **Abb. 8**<sup>1</sup>. Bei diesem terrestrischen Laserscanner (TLS) handelt es sich um einen reinen Profilerscanner, bei dem im Gegensatz zu 3D-TLS der Laserstrahl nur in einer Richtung über das Messobjekt geführt wird. Die Laserstrahlablenkung erfolgt mithilfe der Ablenkeinheit deswegen auch nur um eine Achse, siehe Abschnitt 2.1.3. Bei horizontiertem Gerät ist diese Achse horizontal ausgerichtet. Die originären Messgrößen sind eine Distanz (inklusive Intensität) und ein Winkel pro Messpunkt, die zusätzlich um einen Zeitstempel ergänzt werden können, da der Scanner mit einem GPS-Empfänger ausgestattet ist, siehe Abschnitt 2.1.4.

---

<sup>1</sup> Die Nummerierung sämtlicher Abbildungen, Tabellen und Formeln sind über die jeweilige Seitenzahl definiert.



**Abb. 8.:** Ansichten des Z+F Profiler 9012 aus [Frö14].

Die maximale Messentfernung beträgt 119 m (Eindeutigkeitsintervall) und die maximale Datenaufnahmerate 1 Million Punkte pro Sekunde. Der relevante Ausschnitt aus den Herstellerangaben ist in **Tab. 8** zusammengefasst, die kompletten Herstellerangaben finden sich im technischen Datenblatt, siehe [Frö17].

Lasermesssystem	
Laserkategorie	1 (nach EN60825-1 / ANSI Z136.1)
Strahldivergenz	$< 0,5 \text{ mrad}^2$
Strahldurchmesser	ca. 2,0 mm (in 0,1 m Distanz) <sup>3</sup>
Entfernungsaufösung (Einzelpunkt)	0,1 mm
Linearitätsfehler	$\leq 1 \text{ mm}$
Temperaturdrift im gesamten Betriebsbereich (-10 °C ... 45 °C)	$< 0,3 \text{ mm}$ mit Referenzplatte $< 2 \text{ mm}$ ohne Referenzplatte

Ablenkeinheit	
Anzahl Encoderticks	40.960
Winkelaufösung	0,0088°
Winkelunsicherheit	0,02° Root Mean Square (RMS)

**Tab. 8.:** Ausgewählte Herstellerangaben für den Z+F Profiler 9012.

<sup>2</sup> Angabe Divergenz als Halbwinkel, persönliche Kommunikation S. Kurz, Zoller+Fröhlich.

<sup>3</sup> Angabe der Strahltaile.

---

### 2.1.1 Konstruktive Adaptionen für die Überwachung von Tragwerken

---

Aufgrund der eigentlichen Anwendung des Z+F Profiler 9012 auf mobilen Plattformen bedarf das Messsystem konstruktiver Adaptionen, um für die Überwachung von Tragwerken eingesetzt werden zu können, auf die im Folgenden näher eingegangen wird.

Zur Befestigung des Messsystems stehen lediglich Flansche und Gewindebohrungen am Gehäuse zur Verfügung, siehe **Abb. 8**. Darüber hinaus fehlt eine autonome Stromversorgung. Der Anwender ist mit dem im Lieferumfang enthaltenen Netzteil auf die Nutzung einer Haushaltssteckdose angewiesen. Beide Punkte sind dem eigentlichen Einsatzzweck beim Mobile Mapping geschuldet, da die Stromversorgung bzw. die Halterung individuell an das jeweilige Fahrzeug angepasst werden muss.

Um den Z+F Profiler 9012 auch in typischen Messumgebungen zur Überwachung von Tragwerken autonom nutzbar zu machen, müssen daher zunächst mehrere konstruktive Adaptionen realisiert werden. Mit den am Gehäuse vorhandenen Flanschen und Gewindebohrungen ist der Aufbau auf einem Stativ nicht möglich. Da dies zum Einsatz bei der Überwachung von Tragwerken jedoch notwendig ist, wurden zwei Stativadapter entwickelt, mit denen der Profils Scanner in verschiedenen Ausrichtungen auf einem Stativ aufgebaut werden kann. Die Stativadapter ermöglichen außerdem die Überwachung des Profils Scanners mit einem Neigungssensor.

Zur Gewährleistung einer unabhängigen Stromversorgung (24 V, bis zu 11 A) werden zwei 12 V Autobatterien eingesetzt. Diese wurden in Reihe geschaltet und die entsprechende Verkabelung angefertigt.

Um eine effiziente Einrichtung des Messsystems zu ermöglichen, wurde darüber hinaus ein Adapter zur Anzielung der Messobjekte entworfen. Die angefertigten Adaptionen werden nachfolgend kurz beschrieben:

#### Stativadapter

Zum Aufbau des Profils Scanners auf einem Stativ wurden zwei Stativadapter entwickelt, die sich jeweils für unterschiedliche Einsatzzwecke eignen. Mit dem ersten Stativadapter, siehe **Abb. 9**, wird der Aufbau für vertikale Profilmessungen ermöglicht. Der Profils Scanner ist komplett fixiert, lässt sich aber samt Adapter horizontal drehen, sodass die Objektanzielung ohne Bewegung des Stativs verändert werden kann.

Durch die zusätzlichen Gewindebohrungen an diesem Stativadapter können darüber hinaus Prismen befestigt und so die Position und Ausrichtung des Messsystems bestimmt werden, siehe **Abb. 9**.



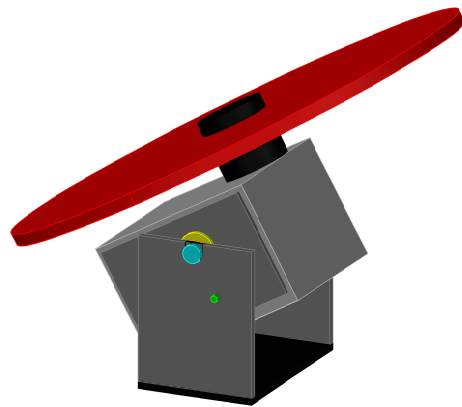
**Abb. 9.:** Stativadapter mit und ohne Profils Scanner sowie mit befestigten Prismen.



Der zweite Stativadapter stellt eine Weiterentwicklung des ersten Stativadapters dar und ermöglicht eine Kippung des Profilschanners, siehe **Abb. 10.a**. Dieser ist dabei nicht komplett durch den Adapter fixiert, sondern drehbar in seinem Schwerpunkt aufgehängt. Durch diese Art der Aufhängung sind Messungen im gesamten Winkelbereich zwischen der Horizontalen und Vertikalen möglich.

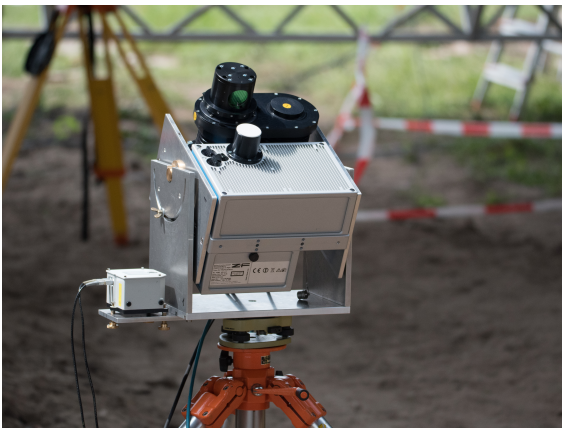
Aufgrund der komplexeren Geometrie und den einzuhaltenden Randbedingungen wurde die Konzeption des Adapters zunächst mittels CAD geplant und modelliert, siehe **Abb. 10.a**. Die wichtigste Randbedingung war dabei, das Sichtfeld des Profilschanners nicht einzuschränken. Darüber hinaus musste wegen der asymmetrischen Aufhängung im Schwerpunkt auch für das Gehäuse und die Verkabelung entsprechend Spielraum eingeplant werden.

Durch die bewegliche Aufhängung des Profilschanners können im Gegensatz zum ersten Stativadapter keine Prismen befestigt werden. Die Bestimmung der Position und Orientierung des Profilschanners ist somit nicht direkt möglich. Bei nicht horizontalen bzw. vertikalen Messungen muss außerdem die entsprechende Projektion berücksichtigt werden.



**Abb. 10.a.:** links: Profilschanner mit kippbarem Stativadapter; rechts: CAD-Modell gekippt, der Lasermessbereich ist in rot angedeutet.

Für beide Stativadapter wurde zusätzlich eine Halterung zur Adaption eines Neigungssensors entwickelt, siehe **Abb. 10.b**. Da die Überwachung von Tragwerken oft im Rahmen von Baumaßnahmen stattfindet, bei denen große Lasteinträge auf den Untergrund einwirken, wird so die Überwachung der Stabilität des Instrumentenstandpunktes ermöglicht.

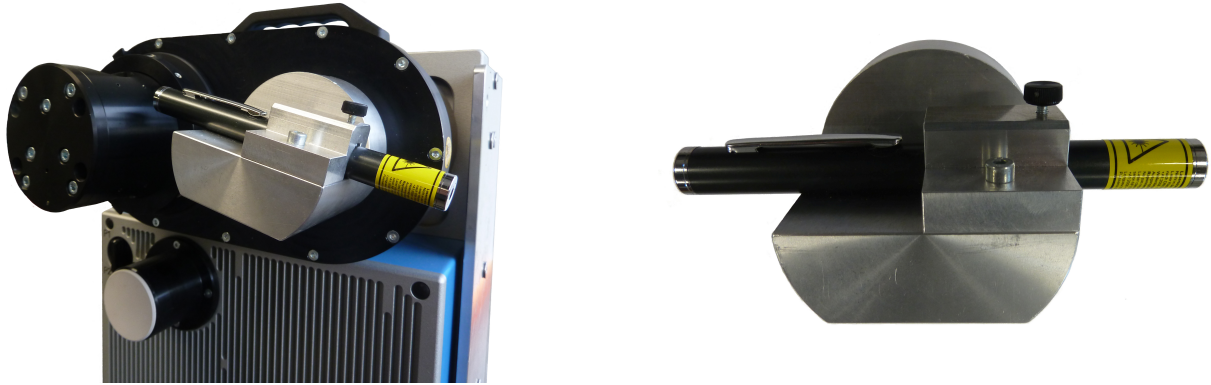


**Abb. 10.b.:** Profilschanner mit adaptiertem Neigungssensor (Leica Nivel210) für beide Stativadapter.

---

### Anzielvorrichtung

Da der Laserstrahl des Z+F Profiler 9012 im nahen Infrarotbereich liegt und somit für das menschliche Auge nicht sichtbar ist, wurde ein Laserpointer zur Grobanzielung adaptiert, siehe **Abb. 11**. Durch die drehbare Halterung des Laserpointers lässt sich die korrekte Ausrichtung auch entlang großer Tragwerke kontrollieren. Im Vergleich zu der Ausrichtung anhand der Scanvorschau wird der Einrichtungsaufwand durch den Einsatz des Adapters deutlich reduziert, siehe Abschnitt 2.1.5.



**Abb. 11.:** Drehbare Anzielvorrichtung.

---

### 2.1.2 Lasermesssystem

---

Das Lasermesssystem realisiert die elektrooptische Distanzmessung und liefert zusätzlich Informationen über die zurückgestrahlte Energie. Dazu kommen bei TLS hauptsächlich zwei Verfahren zum Einsatz: das Phasenvergleichsverfahren und das Impulsmessverfahren. Die jeweiligen Messprinzipien werden ausführlich in der entsprechenden Literatur (z. B. [JSH08]) diskutiert. Dort finden sich auch umfassende Ausführungen zu Fehlereinflüssen und notwendigen Korrekturen.

Beim Z+F Profiler 9012 findet die Distanzmessung nach dem Phasenvergleichsverfahren statt, welches im Vergleich zum Impulsmessverfahren eine höhere Messgeschwindigkeit (bis zu 1017 kHz beim Z+F Profiler 9012), eine feinere Auflösung und eine geringere Messunsicherheit bietet.

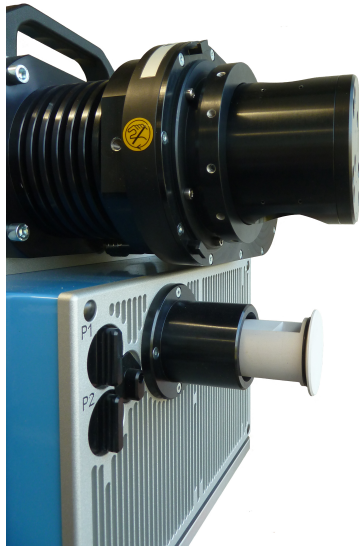
Grundsätzlich kann es bei der elektrooptischen Distanzmessung aufgrund der Erwärmung des Lasers im Betrieb zu einer Verfälschung der Distanzmessung kommen. Bei 3D-TLS wird zur Korrektur dieser Temperaturdrift eine interne Referenzdistanz verwendet. Da 3D-TLS typischerweise ein vertikales Sichtfeld von maximal 320° haben, finden bei jedem Gehäusedurchgang des Laserstrahls Messungen auf dieser Referenzdistanz statt.

Unter der Annahme, dass die Veränderung der dort gemessenen Distanz aus einer temperaturabhängigen Drift resultiert, können sämtliche Distanzmessungen mithilfe des dadurch bestimmten Faktors kontinuierlich korrigiert werden.

Da der Z+F Profiler 9012 ein vertikales Sichtfeld von 360° besitzt, findet kein Gehäusedurchgang des Laserstrahls statt. Als Ersatz für eine interne Referenzdistanz existiert jedoch eine ausfahrbare Referenzplatte, die in die Laserebene eingebracht werden kann, siehe **Abb. 12**. Standardmäßig wird die Referenzplatte nach 30 Sekunden Messung wieder eingefahren und die Korrektur anschließend anhand einer Lookup-Tabelle und internen Temperaturmessungen rein rechnerisch an die Distanzmessungen angebracht. Für Messungen des Z+F Profiler 9012 mit der, im Rahmen der Herstellerkalibrierung scannerspezifisch in einer Klimakammer bestimmten Lookup-Tabelle, gibt der Hersteller die Temperaturdrift mit < 2 mm für den gesamten Temperaturbereich an, siehe auch **Tab. 8**.



Für höhere Genauigkeitsanforderungen besteht darüber hinaus auch die Möglichkeit, die Referenzplatte in der ausgefahrenen Position zu belassen, wodurch sich die Temperaturdrift laut Hersteller auf  $< 0,3$  mm reduziert. Das somit verbleibende Sichtfeld wird auf ca.  $340^\circ$  beschränkt.



**Abb. 12.:** Z+F Profiler 9012 mit ausgefahrener Referenzplatte.

Da der Winkelbereich der Referenzplatte unterhalb des Profilerscanners bei der Überwachung von Tragwerken nicht relevant ist, wird zur Reduktion etwaiger Effekte aufgrund einer Temperaturdrift bei allen Untersuchungen, die in dieser Arbeit vorgestellt werden, die Referenzplatte während der kompletten Messung im ausgefahrenen Zustand belassen. Die Distanzkorrektur aufgrund von Temperatureinflüssen findet somit genau wie bei einem 3D-TLS permanent über die Referenzdistanz statt.<sup>4</sup>

Zusätzlich zu der gemessenen Distanz wird auch ein Intensitätswert für jeden Messpunkt bestimmt. Dieser stellt ein Maß für den Anteil der rückgestrahlten Energie des Laserstrahls dar. Grundsätzlich nimmt die Energie quadratisch mit der Entfernung ab. Darüber hinaus existieren jedoch noch weitere Einflüsse, die die Intensität verringern, wie beispielsweise die Dämpfung aufgrund der Atmosphäre, schräge Auftreffwinkel auf dem Messobjekt, die Oberflächenbeschaffenheit und -farbe des Messobjektes. Der Intensitätswert ist somit nicht nur von der Entfernung, sondern auch von allen auf den Messprozess einwirkenden äußeren Größen abhängig.

Inwiefern sich der Intensitätswert aufgrund der einwirkenden äußeren Größen verändert, hängt auch von dem eingesetzten Laser und seiner Wellenlänge ab. Der im Z+F Profiler 9012 eingesetzte Laser hat eine Wellenlänge von  $1500\text{ nm}$ <sup>5</sup>. Die Wahl der Wellenlänge im nahen Infrarotbereich (NIR) hat den Vorteil, dass deutlich höhere Laserleistungen möglich sind, ohne den augensicheren Arbeitsbereich zu verlassen, siehe [IEC08]. Dies begründet sich darin, dass die Auswirkung von Laserstrahlung auf biologisches Gewebe u. a. von der Wellenlänge abhängt. Dabei ist das menschliche Auge aufgrund seiner optischen Eigenschaften besonders durch kollimierte Laserstrahlung gefährdet. Die Eindringtiefe ins Auge ist bei Laserstrahlung mit einer Wellenlänge im NIR deutlich geringer als bei Strahlung im Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichtes, da ein Großteil der Energie schon im Glaskörper absorbiert wird. Somit kann durch Laserstrahlung im NIR weniger Schaden auf der Netzhaut entstehen.

Der gewählte Wellenlängenbereich hat darüber hinaus auch Auswirkung auf die Strahlcharakteristik, insbesondere auf den Laserstrahlradius in einer bestimmten Entfernung. Wie in **Abb. 13.b** dargestellt, nimmt

<sup>4</sup> Persönliche Kommunikation S. Kurz, Zoller+Fröhlich.

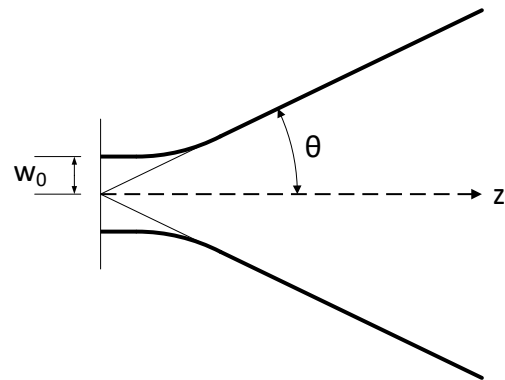
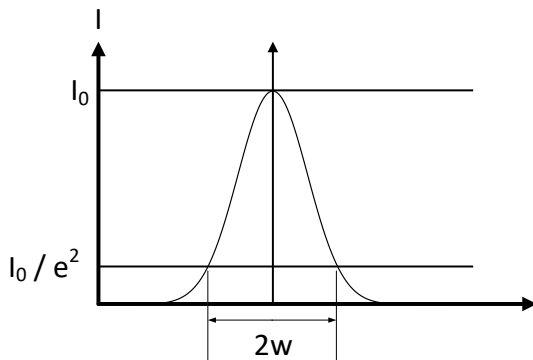
<sup>5</sup> Persönliche Kommunikation M. Mettenleiter, Zoller+Fröhlich.

der Durchmesser des Messlasers mit der Entfernung zu, er divergiert. Dabei hängt der Divergenzwinkel  $\Theta$  idealisiert betrachtet von zwei Parametern ab:

- der Laserwellenlänge  $\lambda$  und
- dem minimalen Radius des fokussierten Laserstrahls (Radius an der Strahltaile  $w_0$ ) bzw. dessen Position, siehe **Abb. 13.b**.

Basierend auf diesen beiden Größen kann der Divergenzwinkel und damit auch der Radius des Laserstrahls berechnet werden. Dabei muss berücksichtigt werden, dass ein Laserstrahl keine scharfe Begrenzung aufweist und somit der Strahlradius zunächst einer Definition bedarf.

Die Intensitätsverteilung eines Laserstrahls über den Strahlquerschnitt wird idealisiert betrachtet als eine Gaußverteilung beschrieben, siehe **Abb. 13.a**. Auf dieser Grundlage wird der Strahlradius  $w$  auf einen  $1/e^2$  Intensitätsabfall bezogen.<sup>6</sup> Der so beschriebene Laserspot beinhaltet 86 % der Gesamtenergie der angenommenen gaußförmigen Intensitätsverteilung des Messlasers.



**Abb. 13.a.:** Strahlradius  $w$  mit definiertem Intensitätsabfall der gaußförmigen Verteilung.

**Abb. 13.b.:** Strahldivergenz  $\Theta$  mit Strahltaile  $w_0$ .

Mit der Laserwellenlänge  $\lambda = 1500 \text{ nm}$  des Z+F Profiler 9012 und dem entsprechenden Radius an der Strahltaile<sup>7</sup>  $w_0 = 1 \text{ mm}$  ergibt sich der Divergenzwinkel  $\Theta$  entsprechend **Abb. 13.b** zu:

$$\Theta = \frac{\lambda}{\pi \cdot w_0} = \frac{1500 \text{ nm}}{\pi \cdot 1 \text{ mm}} = 0,477 \text{ mrad.} \quad (13.a)$$

Bei dem so berechneten Winkel handelt es sich um den Divergenzwinkel als Halbwinkel, d. h. er gilt, wie in **Abb. 13.b** dargestellt, für den Strahlradius  $w$ . Dieser nimmt entsprechend dem Divergenzwinkel mit größer werdendem Abstand  $z$  von der Strahltaile  $w_0$  zu:

$$w(z) = w_0 \cdot \sqrt{1 + \left( \frac{\Theta \cdot z}{w_0} \right)^2}. \quad (13.b)$$

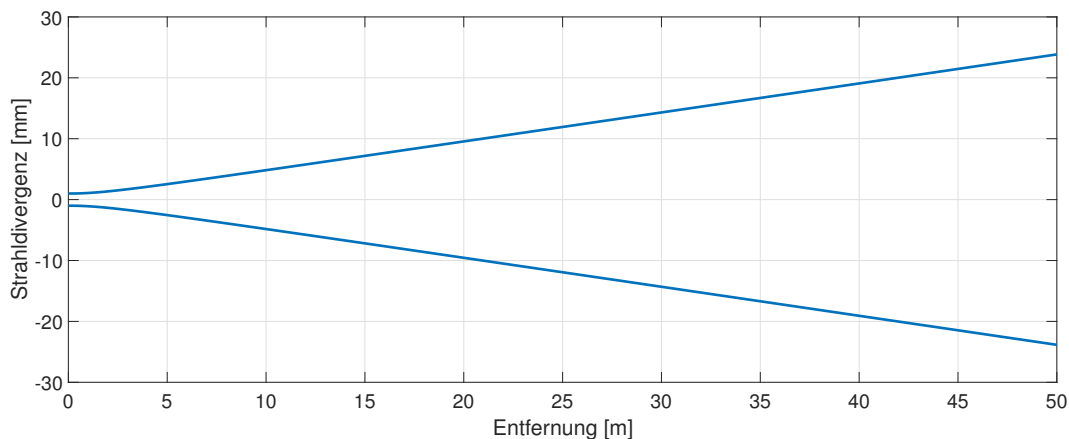
<sup>6</sup> Persönliche Kommunikation S. Kurz, Zoller+Fröhlich.

<sup>7</sup> Siehe Datenblatt Z+F Profiler 9012.

Die Charakteristik eines Laserstrahls kann darüber hinaus u. a. über die Rayleighlänge  $z_0$  beschrieben werden. Sie gibt an, in welcher Entfernung von der Strahltaile sich die Laserspotquerschnittsfläche verdoppelt. Der Strahlradius ist an dieser Stelle um den Faktor  $\sqrt{2}$  größer als an der Strahltaile:

$$z_0 = \frac{\pi \cdot w_0^2}{\lambda} = \frac{\pi \cdot 1 \text{ mm}^2}{1500 \text{ nm}} = 2,1 \text{ m.} \quad (14)$$

In **Abb. 14** ist der Strahldurchmesser für den im Datenblatt aufgeführten Entfernungsbereich dargestellt. Insbesondere im Nahbereich ( $z < z_0$ ) verhält sich der Laserstrahl näherungsweise wie ein paralleles Strahlenbündel. In größeren Entfernungen ( $z \gg z_0$ ) hängt der Strahlradius  $w$  fast ausschließlich von dem Divergenzwinkel  $\Theta$  ab und nimmt nahezu linear mit diesem zu.



**Abb. 14.:** Laserstrahlradius  $w$  über den im Datenblatt beschriebenen Entfernungsbereich  $z$  aufgetragen.

Für die weiteren Untersuchungen ist die Kenntnis der Lasercharakteristik wichtig, da die Größe des Laserspots insbesondere bei theoretischen Fehlerbetrachtungen berücksichtigt werden muss. Zusätzlich kann es je nach Abtastintervall zu einer Überlappung angrenzender Profilmesspunkte kommen, wodurch teilweise der gleiche Bereich der abgetasteten Oberfläche in die Distanzmessung angrenzender Profilmesspunkte mit eingeht. Diese Messpunkte sind somit aufgrund auftretender räumlicher Korrelationen nicht komplett unabhängig voneinander, siehe Abschnitt 2.2.1.

### 2.1.3 Ablenkeinheit

Die zweite Hauptkomponente des verwendeten Profilschanners ist die Ablenkeinheit, die im Folgenden näher betrachtet wird. Sie besteht aus einem gekapselten rotierenden Spiegel, dessen reflektierende Oberfläche 45 Grad zur Laserstrahlachse geneigt ist und somit den Laserstrahl im Idealfall rechtwinklig ablenkt. Weitere Details werden u. a. in [Gor08] ausführlich beschrieben.

In Abhängigkeit von der Rotationsgeschwindigkeit werden die Messungen automatisch in diskreten Winkelintervallen durchgeführt. Innerhalb der einzelnen Profile erfolgt somit eine willkürliche Messpunktauswahl. Der Abgriff der Winkelwerte wird mit einem Encoder realisiert, der entsprechend dem Vertikalteilkreis eines Tachymeters im Profilschanner verbaut ist. Dieser Encoder besitzt 40.960 Encoderticks (Messstellen), denen rein theoretisch jeweils eine Distanzmessung zugeordnet werden kann. Durch die Anzahl der Encoderticks wird die Winkelauflösung definiert und beträgt  $360/40.960$ , also ungefähr 0,0088 Grad, siehe auch **Tab. 8**.

Basierend auf den möglichen Messraten der Distanzmessung des Z+F Profiler 9012 und der Anzahl der Encoderticks (40.960) ist der Speicherplatz pro Profil festgelegt. Je nach Messmodus (Standardmessmodi) können 20.480, 10.240 oder 5.120 Punkte gespeichert werden. Eine ausführliche Darstellung der möglichen Messmodi und ihrer Eigenschaften findet sich in Abschnitt 2.2.1 und dort speziell in **Tab. 20**.

Mit diesen Größen kann keine Rotationsgeschwindigkeit mit einer ganzzahligen Frequenz ermöglicht werden. Deshalb entstehen anstatt 50, 100 oder 200 Hz die folgenden theoretischen Rotationsgeschwindigkeiten: 49,644 Hz, 99,289 Hz und 198,579 Hz.

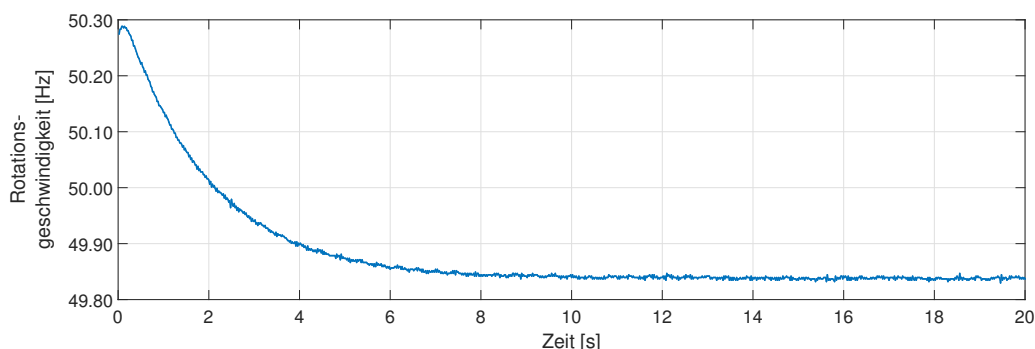
Da die Rotationsgeschwindigkeit beim eigentlichen Einsatzzweck des Z+F Profiler 9012 auf mobilen Plattformen aufgrund äußerer Einflüsse (wie z. B. Stöße und Vibrationen) variieren kann, ist eine Realisierung dieser theoretischen Rotationsgeschwindigkeiten nicht sinnvoll. Durch den bereits erwähnten limitierten Speicherplatz pro Profil könnte eine Reduktion der Rotationsgeschwindigkeit und eine dadurch bedingte Erhöhung der Messpunktanzahl pro Profil zu Messpunktverlusten führen. Da die Synchronisationsinformation direkt den Messpunkten zugeordnet wird, besteht dann die Gefahr, dass diese Information ebenfalls verloren geht, siehe Abschnitt 2.1.4.

Um dieses Problem zu umgehen, wurden die realen Rotationsgeschwindigkeiten vom Hersteller um 0,4 %, bezogen auf die theoretischen Rotationsgeschwindigkeiten, erhöht. Die tatsächlichen Rotationsgeschwindigkeiten sind daher: 49,839 Hz, 99,679 Hz und 199,357 Hz.

Die Punktanzahl, die pro Profil gespeichert werden kann, liegt somit im Durchschnitt bei ungefähr 20.400, 10.200 oder 5.100 Punkten. Durch dieses Vorgehen sollte, auch bei einer durch äußere Einflüsse hervorgerufenen Reduktion der Rotationsgeschwindigkeit, die maximale Punktanzahl pro Profil nicht überschritten werden. Einem Messpunktverlust, und damit einem Verlust der Synchronisationsinformation wird somit vorgebeugt.

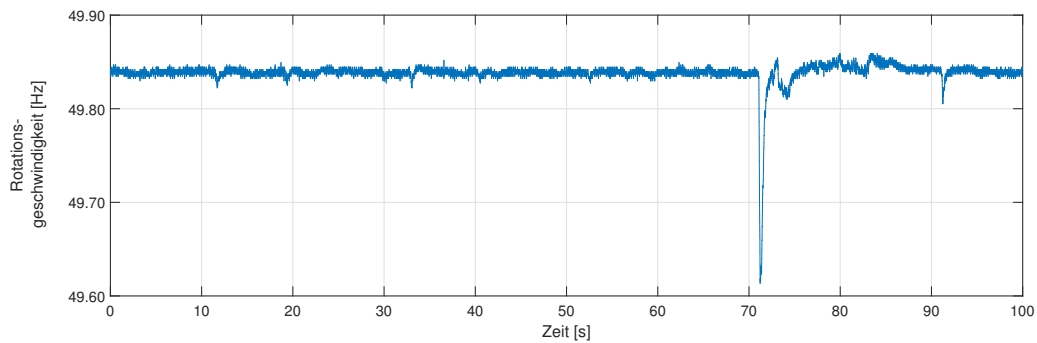
Die Motorsteuerung ist grundsätzlich nicht darauf ausgelegt die Rotationsgeschwindigkeit konstant zu halten, sondern möglichst energieeffizient zu arbeiten. Ein ständiges Nachregeln der Rotationsgeschwindigkeit, bedingt durch bewegungsinduzierte Änderungen auf mobilen Plattformen, z. B. aufgrund von Kreiseffekten, Stößen und Vibrationen findet nicht statt, da ein solches Vorgehen die Stromaufnahme deutlich erhöhen würde.

Während der Messung mit dem Z+F Profiler 9012 muss daher mit Geschwindigkeitsvariationen gerechnet werden. Weiterhin ist zu beachten, dass insbesondere zu Beginn der Messung etwa zehn Sekunden vergehen, bis die vorgegebene Rotationsgeschwindigkeit erreicht wird. In diesem Zeitraum ändert sich die Rotationsgeschwindigkeit noch um bis zu 0,4 Hz, siehe **Abb. 15**.



**Abb. 15.:** Abnahme der Rotationsgeschwindigkeit direkt nach dem Erreichen der Messbereitschaft.

Die anschließenden Variationen der Rotationsgeschwindigkeit liegen im Falle eines unbewegten Instrumentes normalerweise im Bereich von wenigen hundertstel Hertz, können aber vereinzelt auch größere Werte annehmen, siehe **Abb. 16.a**.



**Abb. 16.a.:** Variation der Rotationsgeschwindigkeit für ein unbewegtes Instrument.

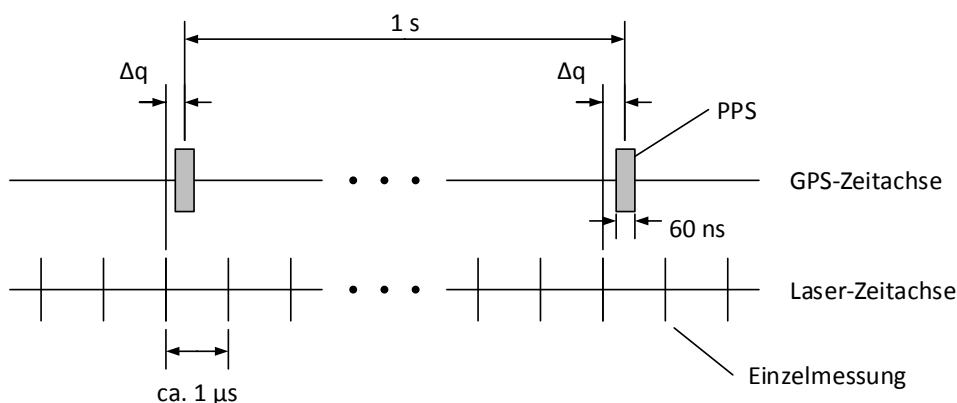
Diese Variationen führen zu unterschiedlichen räumlichen Abständen der Profilpunkte. Für den Standardanwendungsfall (Mobile Mapping) spielt die niedrigere Rotationsgeschwindigkeit und ihre Variation keine Rolle. Es findet keine Zuordnung der Messpunkte zu den einzelnen Messprofilen statt, da jeder Messpunkt mittels externer Sensorik in ein übergeordnetes Koordinatensystem transformiert wird.

Beim Einsatz zur Überwachung von Tragwerken ist die Zuordnung der Messpunkte zu den entsprechenden Messprofilen jedoch die Grundlage der zeitlichen Prozessierung. Die Messfrequenz und ihre theoretischen Variationen sollten über die gesamte Messdauer hinweg bekannt sein.

Um trotz möglicher Variationen eine vergleichbare Zeitbasis zu erhalten sowie etwaige Variationen der Rotationsgeschwindigkeit auszugleichen, ist es deshalb notwendig, die Messwerte entsprechend auf 50 Hz, 100 Hz oder 200 Hz zu interpolieren. Dazu wird der mittels GPS generierte Zeitstempel verwendet, der im nächsten Abschnitt näher beschrieben wird.

#### 2.1.4 Synchronisation

Für die Synchronisation der Profilmesspunkte wird ein GPS-Empfänger verwendet. Bei diesem handelt es sich um ein modifiziertes u-blox Precision Timing Evaluation Kit. Die Stromversorgung und der Ausgabekanal des PPS (pulse per second) wurde auf die Konfiguration des Z+F Profiler 9012 angepasst. Die PPS-Unsicherheit des Precision Timing Ausgangs des GPS-Empfängers wird vom Hersteller mit 30 ns als Root Mean Square (RMS) bzw. 60 ns ( $3\sigma$ ) angegeben, siehe [ubl17].



**Abb. 16.b.:** Verschiedene relevante Zeitachsen des Messsystems mit auftretenden Ereignissen (PPS und Distanzmessung).

In **Abb. 16.b** sind die für die Synchronisation der Messpunkte relevanten Zeitachsen dargestellt: die GPS-Zeit und die Laser-Zeit. Zusätzlich sind die der jeweiligen Zeitachse zugeordneten Ereignisse markiert: für die GPS-Zeitachse die PPS und für die Laser-Zeitachse die Distanzmessungen.

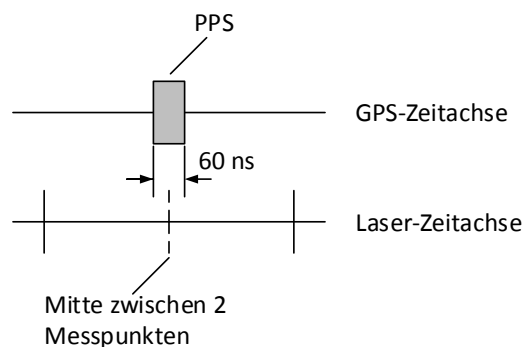
Der niederfrequente PPS (GPS-Zeitachse) wird direkt in den hochfrequenten Messdatenstrom integriert. Zu Beginn der Messung wird dabei die UTC-Zeit im Fileheader (siehe Abschnitt 2.1.5) abgespeichert und im Anschluss entsprechend dem PPS jede Sekunde ein Zähler inkrementiert.

Dabei wird der Zähler direkt der zeitlich nächstgelegenen Messung zugeordnet. Bei einer maximalen Messrate von ca. 1 MHz entspricht der minimale zeitliche Punktabstand ungefähr  $1\ \mu\text{s}$ . Dadurch entsteht ein maximaler Quantisierungsfehler  $\Delta q$  von ca. 500 ns, siehe **Abb. 16.b**.

Die absolute Zeitunsicherheit wird durch die Kombination der PPS-Unsicherheit und dem Quantisierungsfehler gebildet. Die relative Zeitunsicherheit wird dagegen nur durch die PPS-Unsicherheit bestimmt, da der Quantisierungsfehler normalerweise als quasi konstant angenommen werden kann. Diese Unterscheidung ist insbesondere bei der Synchronisation mit weiterer Sensorik zu beachten.

Theoretisch existiert ein Sonderfall, bei dem diese Annahme nicht zutrifft, siehe **Abb. 17**. Fällt der Puls auf den zeitlichen Mittelpunkt zwischen zwei Lasermessungen ( $\pm 30\ \text{ns}$ ), wird dieser im Rahmen der PPS-Unsicherheit entweder dem vorherigen oder dem darauf folgenden Messpunkt zugeordnet. Im Falle dieser Konfiguration könnte ein maximaler Fehler von ungefähr  $1\ \mu\text{s}$  entstehen.

Da der Zeitstempel der Messpunkte zwischen zwei Zählerinkrementen anschließend durch lineare Interpolation berechnet wird, reduziert sich die Auswirkung des beschriebenen Sonderfalls auf die einzelnen Messpunkte entsprechend.



**Abb. 17.:** Theoretischer Sonderfall, bei dem aufgrund der PPS Unsicherheit die Zuordnung zu den Messpunkten variieren kann.

---

### 2.1.5 Software

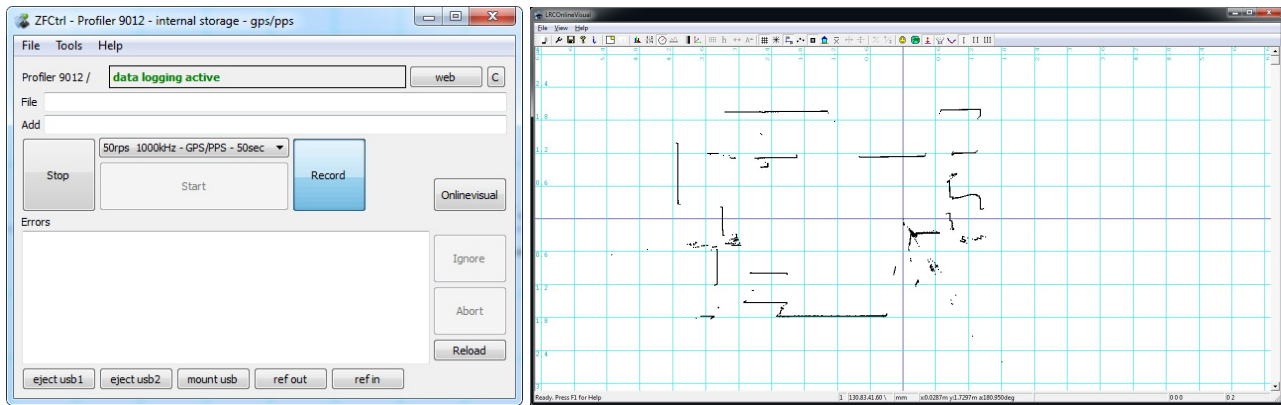
---

Im Lieferumfang des Z+F Profiler 9012 ist ein Software Development Kit (SDK) in der Programmiersprache C++ enthalten. Mit diesem besteht die Möglichkeit, die komplette Ansteuerung und Integration des Sensors in bereits bestehende Abläufe umzusetzen.

Das SDK beinhaltet u. a. die Steuersoftware ZFCtrl, siehe **Abb. 18**, mit der auch eine Live Vorschau des aktuellen Messprofils ermöglicht wird.

Die Ansteuerung mittels ZFCtrl findet über definierbare Befehlszeilen statt. Im Folgenden ist der Aufbau einer solchen Befehlszeile exemplarisch angegeben:

```
„-profiler -resolution sh -quality h -linestream all -statusstream -ip 130.83.41.62 -linestreamport 6101  
-statusstreamport 6102 -gps -pps -lines 2550 -cnt2 -cnt2reset -writing 0“.
```



**Abb. 18.:** Mitgelieferte Steuersoftware ZFCtrl inklusive Live Vorschau der aktuellen Profilmessung.

Die mitgelieferte Software ZFCtrl erfüllt alle Anforderungen an die Anwendung zur Überwachung von Tragwerken, da alle benötigten Konfigurationsparameter an den Scanner übergeben werden können. Somit wird auf eine eigene Realisierung der Scanneransteuerung verzichtet. In **Tab. 18** sind die wichtigsten Befehle für den Z+F Profiler 9012 und deren Funktion zusammengefasst.

<i>-resolution</i> [super-high (sh), high (h), low (l)]	Lasermessgeschwindigkeit
<i>-quality</i> [high (h), normal (n), low (l)]	Rotationsgeschwindigkeit
<i>-gps</i>	GPS Position detektieren und in Lineheader schreiben
<i>-pps</i>	PPS detektieren und an Counter 1 übergeben
<i>-cnt2 -cnt2reset</i>	Counter 2 wird aufgezeichnet und zu beginn auf Null gesetzt
<i>-lines</i> [Anzahl]	Anzahl aufzunehmender Profile vor automatischem Herunterfahren
<i>-repeat</i> [Anzahl]	Automatische Wiederholung der gleichen Scankonfiguration
<i>-delay</i> [ns]	Pause zwischen Wiederholungen (in Kombination mit <i>repeat</i> )
<i>-writing</i> [1, 0]	Scan startet automatisch oder startet im Pause Modus

**Tab. 18.:** Relevante Ansteuerungsbefehle für den Z+F Profiler 9012.

Die Profilschannermessungen werden auf der internen Festplatte im Herstellerdatenformat (\*.zfs) abgespeichert. Bei diesem Datenformat handelt es sich um eine binäre speichereffiziente Realisierung, in der alle Scandaten hinterlegt sind. Im Fileheader der Datei sind der Scannerstatus, sämtliche Einstellungen und andere relevante Informationen, wie die absolute GPS-Zeit hinterlegt.

Der Export der relevanten Daten aus dem intern abgespeicherten Profilschann wird mit einem selbst entwickelten Export-Programm auf Basis des SDK realisiert. Dabei wird die Synchronisation (Zuordnung von Zeitstempeln) realisiert und sämtliche Messpunkte des Profilschanns werden in ein MATLAB-kompatibles Datenformat konvertiert.



---

## 2.2 Eigenschaften von Profilsclannermessungen

---

Ein Profilsclann ist die Gesamtheit aller Profilsclannermessungen, die durch die Art der Aufnahme in Profilen organisiert sind, d. h. ein Profilsclann besteht aus einzelnen Messprofilen, in denen wiederum die Messpunkte enthalten sind. Mit der Zuordnung zu Profilen wird die Definition der Messpunkte für die Überwachung von Tragwerken um eine zeitliche Komponente erweitert. Zur Verdeutlichung dieser Zuordnung wird deshalb im Folgenden die Bezeichnung Profilmesspunkt verwendet.

Neben der Profilnummer, dem entsprechenden Zeitstempel und der Intensität ist ein Profilmesspunkt theoretisch durch die originären Winkel- und Distanzmesswerte definiert. Auf diese polaren Messelemente kann jedoch nicht zugegriffen werden, da der Hersteller daraus kartesische Koordinaten unter Berücksichtigung von geräteinternen Kalibrierwerten im Koordinatensystem des Profilsclanners berechnet. Für die Analyse von Profilsclans auf Basis der geometrischen Komponenten der Profilmesspunkte stehen daher lediglich abgeleitete kartesische Koordinaten zur Verfügung, die aufgrund der funktionalen Zusammenhänge mit denselben originären Messelementen miteinander korreliert sind.

Im Folgenden werden die Profilsclannermessungen anhand einer detaillierten Betrachtung der für die Überwachung von Tragwerken relevanten Begriffe charakterisiert. In Abschnitt 2.2.1 wird zunächst die Definition eines Messprofils näher erläutert und ergänzend dazu in Abschnitt 2.2.2 weiter auf die Eigenschaften von Profilmesspunkten eingegangen.

---

### 2.2.1 Messprofil

---

Für die Überwachung von Tragwerken muss die Definition eines Messpunktes noch um die Zuordnung zu einem Messprofil erweitert werden. Durch diese Zuordnung wird die eigentliche Zeitbasis der Messpunkte definiert, da somit die Frequenz der wiederholten Messung des Tragwerks festgelegt ist.

Geometrisch betrachtet handelt es sich bei einem Messprofil um die Gesamtheit aller in einer Umdrehung der Ablenkeinheit bestimmten Profilmesspunkte. Es entspricht einem diskretisierten Schnitt der Laserrotationsebene mit der Umgebung.

Da das Lasermesssystem und die Ablenkeinheit jeweils mit verschiedenen Frequenzen betrieben werden können, hängt die Punktdichte bzw. das Diskretisierungsintervall im Messprofil von der Wahl dieser Parameter ab und wird über den sogenannten Messmodus festgelegt. Dieser ergibt sich aus der Kombination von Rotationsgeschwindigkeit und Lasermessrate, siehe **Tab. 20**.

Vom Hersteller wurden sechs mögliche Kombinationen aus Lasermessrate und Rotationsgeschwindigkeit als Standardmessmodi definiert. Diese Auswahl wurde aufgrund der Anforderungen für die Anwendung auf bewegten Plattformen getroffen und ist darin begründet, dass für den Standardanwendungsfall die Punktdichte pro Profil einen festgelegten Wert nicht unterschreiten soll.

Über diese Standardmessmodi hinaus besteht die Möglichkeit, weitere Kombinationen aus Rotations- und Lasermessgeschwindigkeit selbst zu definieren. Diese Kombinationen werden als erweiterte Messmodi bezeichnet und sind gemeinsam mit den Standardmessmodi in **Tab. 20** dargestellt. Darin sind für jeden Messmodus die maximale theoretische Punktzahl pro Profil und das entsprechende Winkelinkrement zwischen diesen Punkten angegeben.

Zu den erweiterten Messmodi gehört auch die vom Hersteller definierte Standard Lasermessrate von 127 kHz. Bei dieser handelt es sich um die Lasermessrate, mit der die Angaben zum Rauschen der Distanzmesseinheit für alle Z+F TLS bestimmt werden, siehe u. a. [Frö17]. Bei der Verwendung von höheren Lasermessraten im praktischen Einsatz muss daher berücksichtigt werden, dass das Distanzmessrauschen entsprechend zunimmt.

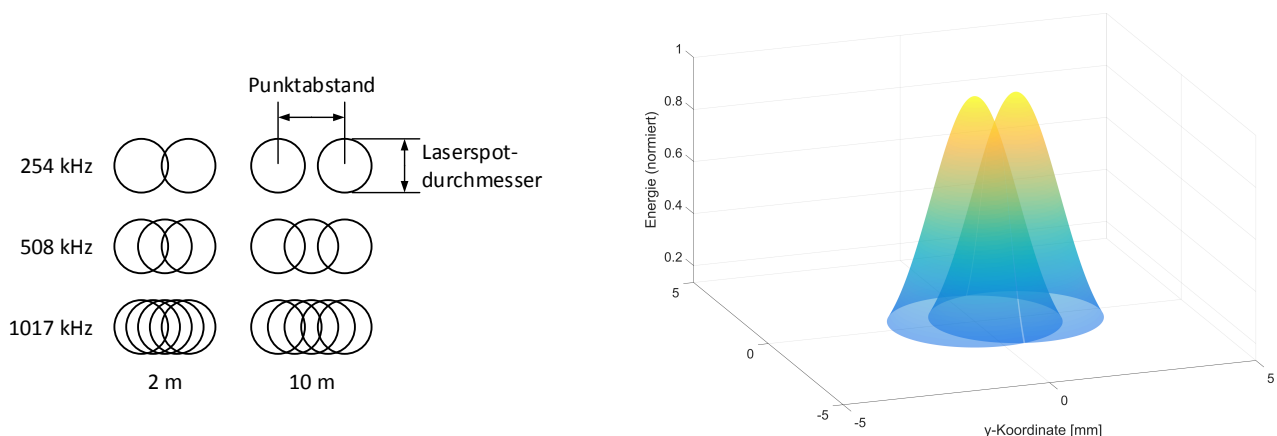


Lasermessrate	Rotationsgeschwindigkeit					
	50 Hz		100 Hz		200 Hz	
1017 kHz	20480 <sup>8</sup>	0,0175°	10240 <sup>8</sup>	0,0350°	5120 <sup>8</sup>	0,0700°
508 kHz	10240 <sup>8</sup>	0,0350°	5120 <sup>8</sup>	0,0700°	2560 <sup>9</sup>	0,1400°
254 kHz	5120 <sup>8</sup>	0,0700°	2560 <sup>9</sup>	0,1400°	1280 <sup>9</sup>	0,2800°
127 kHz <sup>10</sup>	2560 <sup>9</sup>	0,1400°	1280 <sup>9</sup>	0,2800°		
64 kHz	1280 <sup>9</sup>	0,2800°				

**Tab. 20.:** Maximale Anzahl der Punkte pro Profil und Winkelinkremente für mögliche Kombinationen aus Lasermessrate und Rotationsgeschwindigkeit.

Entsprechend dem gewählten Messmodus werden bei der Abtastung des Objektes die Charakteristiken der Ablenk- und Distanzmesseinheit kombiniert. Hierbei bedarf das Verhältnis von Laserspotdurchmesser zu Punktabstand einer näheren Betrachtung.

Aufgrund des Divergenzwinkels des Z+F Profiler 9012 von ungefähr 0,95 mrad als Vollwinkel, vergleiche Abschnitt 2.1.2, kann es je nach Kombination von Lasermessrate und Rotationsgeschwindigkeit zu einer Überlagerung der Laserspots aufeinanderfolgender Profilmesspunkte kommen, siehe **Abb. 20** links.



**Abb. 20.:** Zwei- und dreidimensionale Überlagerung angrenzender Laserspots; links: bei unterschiedlichen Lasermessraten und einer Rotationsgeschwindigkeit von 50 Hz; rechts: unter der Annahme einer idealisierten Gaußverteilung.

In **Tab. 21** sind die Überlagerungen angrenzender Laserspots für eine Rotationsgeschwindigkeit von 50 Hz und Lasermessraten von 1017 kHz und 508 kHz aufgetragen. Für die Berechnungen wurden die Annahmen entsprechend Abschnitt 2.1.2 verwendet und von einem Auftreffwinkel des Laserstrahls auf die Oberfläche von 90° ausgegangen.

Es zeigt sich in beiden Fällen, dass die prozentuale Überlagerung der angrenzenden Laserspots zunächst mit der Entfernung abnimmt, jedoch ungefähr ab 10 m einen konstanten Wert annimmt. Dieses Verhalten entsteht aufgrund der Lage und dem Verhältnis der Strahltaile zum Divergenzwinkel, siehe Abschnitt 2.1.2. Im Nahbereich dominiert somit der Einfluss der Strahltaile, wohingegen in größeren Entfernungen eine nahezu lineare Zunahme des Laserspotdurchmessers mit der Entfernung vom Profils Scanner auftritt.

<sup>8</sup> Standard Messmodus.

<sup>9</sup> Erweiterter Messmodus.

<sup>10</sup> Standard Lasermessrate für Angaben im Datenblatt zum Distanzrauschen.

Da der Punktabstand linear mit der Entfernung vom Profils Scanner zunimmt, bleibt das Verhältnis dieser beiden Größen somit konstant.

Distanz [m]	Laserspotdurchmesser [mm]	Punktabstand bei 50 Hz und 1017 kHz Messrate [mm]	Überlagerung bei 50 Hz und 1017 kHz Messrate [%]	Punktabstand bei 50 Hz und 508 kHz Messrate [mm]	Überlagerung bei 50 Hz und 508 kHz Messrate [%]
2	2.7	0.6	71	1.2	44
5	5.1	1.5	62	3.1	28
10	9.7	3.1	60	6.1	25
25	23.9	7.6	60	15.3	24
50	47.7	15.3	60	30.5	24
100	95.4	30.5	60	61.1	24

**Tab. 21.:** Übersicht der Laserspotdurchmesser, des Punktabstandes und der Überlagerung bei verschiedenen Lasermessgeschwindigkeiten und Distanzen zwischen Oberfläche und Instrument.

Aufgrund der in **Abb. 20** auf der rechten Seite dargestellten gaußförmigen Energieverteilung des Laserstrahls liegt die sich tatsächlich überlagernde Energie in diesen Flächen jedoch unterhalb der Prozentangaben aus **Tab. 21**.

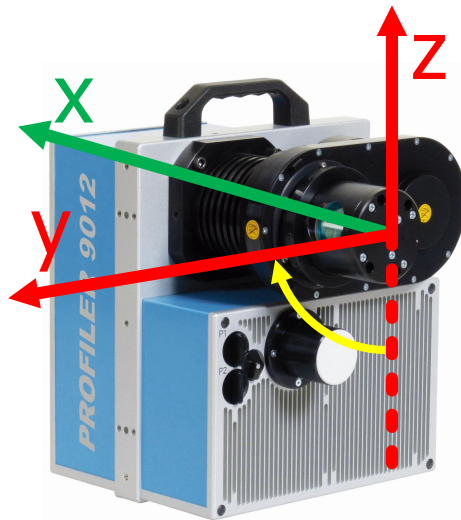
Für die weiteren Betrachtungen kann zunächst allgemein festgehalten werden, dass bei einer Überlagerung der Laserspots teilweise die gleiche Information in die Messergebnisse mit eingeht, wodurch räumliche Korrelationen zwischen den Koordinaten benachbarter Profilmesspunkte entstehen, die u. U. bei der Unsicherheitsbetrachtung berücksichtigt werden müssen.

### 2.2.2 Profilmesspunkt

Neben der Zugehörigkeit zu einem Messprofil erfolgt die Definition eines Profilmesspunktes in erster Linie durch die Festlegung des Koordinatensystems. Bei dem vom Hersteller definierten Koordinatensystem handelt es sich um ein dreidimensionales, rechtshändiges, kartesisches Koordinatensystem, dessen Ursprung in der Drehachse der Ablenkeinheit liegt, siehe **Abb. 22**. Die x-Achse ist aufgrund des hauptsächlichen Einsatzzweckes als Teil eines Mobile Mapping Systems in „Fahrtrichtung“ definiert. Die Nullrichtung der Winkelmesseinrichtung (Ablenkeinheit, siehe Kapitel 2.1.3) fällt mit der negativen z-Achse zusammen und weicht so von der Definition der Koordinatenachsen ab. Die Drehrichtung ist entsprechend der Rotationsrichtung der Ablenkeinheit festgelegt und in **Abb. 22** gelb dargestellt.

Obwohl es sich beim Z+F Profiler 9012 um einen reinen Profils Scanner handelt, werden auch beim Einsatz für die Überwachung von Tragwerken, bei dem sich das Messsystem in Ruhe befindet, dreidimensionale, kartesische Koordinaten erzeugt. Die x-Koordinatenwerte (in „Fahrtrichtung“) entstehen dabei nur aufgrund einer Achsabweichung, d. h. der Laserstrahl wird nicht exakt rechtwinklig abgelenkt. Diese Abweichung wird im Rahmen der Herstellerkalibrierung ermittelt und die x-Koordinatenwerte anschließend auf Basis dieses Wertes rein rechnerisch bestimmt. Für die Überwachung von Tragwerken können die so generierten x-Koordinatenwerte jedoch vernachlässigt werden.

Aus diesem Grund erfolgt der Übergang zu einem zweidimensionalen, kartesischen Koordinatensystem, welches lediglich aus der y- und z-Achse besteht. Die Achsbezeichnungen, der Ursprung, die Nullrichtung der Ablenkeinheit und die Drehrichtung werden dabei beibehalten.



**Abb. 22.:** Z+F Profiler 9012 mit dem herstellerspezifischen Koordinatensystem, wobei die zur Überwachung von Tragwerken verwendeten Koordinatenachsen in rot dargestellt sind.

Die so definierten Koordinaten der Profilmesspunkte werden aus den originären Messelementen (Winkel- und Distanzmesswert) in Kombination mit der Herstellerkalibrierung und weiteren Korrekturen berechnet.

Da die Bestimmung der Messelemente mit unterschiedlichen Komponenten des Z+F Profilers 9012 stattfindet, können Fehler bei der Zuordnung der Distanzmessungen zu den Winkelmessungen zu einer Verfälschung der Koordinaten der resultierenden Profilmesspunkte führen.

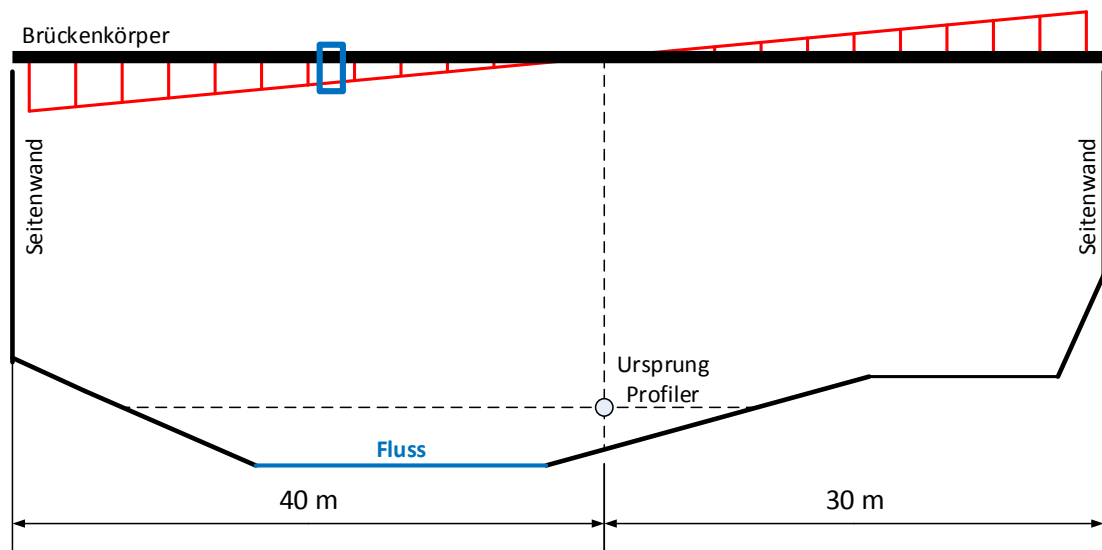
Entsprechend den Erläuterungen zur Ablenkeinheit wird die Winkelmessung des Profilschanners über einen Encoder mit 40.960 Messstellen (Encoderticks) realisiert. Der Encodertickwert gibt dabei die laufende Nummer des Encoderticks an. Jede mit dem Lasermesssystem bestimmte Distanzmessung wird einem dieser Encoderticks zugeordnet, wobei der zugehörige Encodertickwert im Zusammenhang mit der Winkelauflösung den entsprechenden Winkelwert definiert.

Eine fehlerhafte Zuordnung wird im Folgenden als Encoderticksprung bezeichnet und betrifft beim Z+F Profilers 9012 immer ein komplettes Messprofil<sup>11</sup>. Das Resultat eines Encoderticksprungs ist eine scheinbare Verkipfung aller Profilmesspunkte innerhalb des Messprofils um exakt einen Encodertick (+ 0,0088 Grad). Die Auswirkung eines Encoderticksprungs ist in **Abb. 23.a** schematisch am Beispiel eines Brückenprofils in rot dargestellt.

Da der Fokus bei der Überwachung von Brücken hauptsächlich auf der Vertikalverformung liegt, beschränken sich die folgenden Betrachtungen auf die z-Koordinaten der Messpunkte. Entsprechend der rot markierten Auswirkung der Verkipfung in **Abb. 23.a** von 0,0088 Grad entsteht bei einer maximalen räumlichen Ausdehnung der Brücke von 40 m ein maximaler vertikaler Versatz für die z-Koordinaten der Profilmesspunkte von ungefähr 6 mm.

Zusätzlich ist zu erkennen, dass die Verkipfung zwar im ganzen Profil vorhanden ist, sich je nach Lage und gemessener Objektstruktur jedoch unterschiedlich auswirkt. Die z-Koordinaten der Profilmesspunkte direkt oberhalb des Profilschanners werden durch einen Encoderticksprung nicht signifikant verfälscht. Je nach Lage im Profil kommt es zu einer systematischen Verfälschung der Koordinaten der Profilmesspunkte. Trotzdem die Größenordnung der Verfälschung innerhalb der vom Hersteller spezifizierten Winkelunsicherheit liegt, insbesondere durch die Angabe als RMS, siehe **Tab. 8**, besteht die Möglichkeit, die entstehende Auswirkung zu korrigieren.

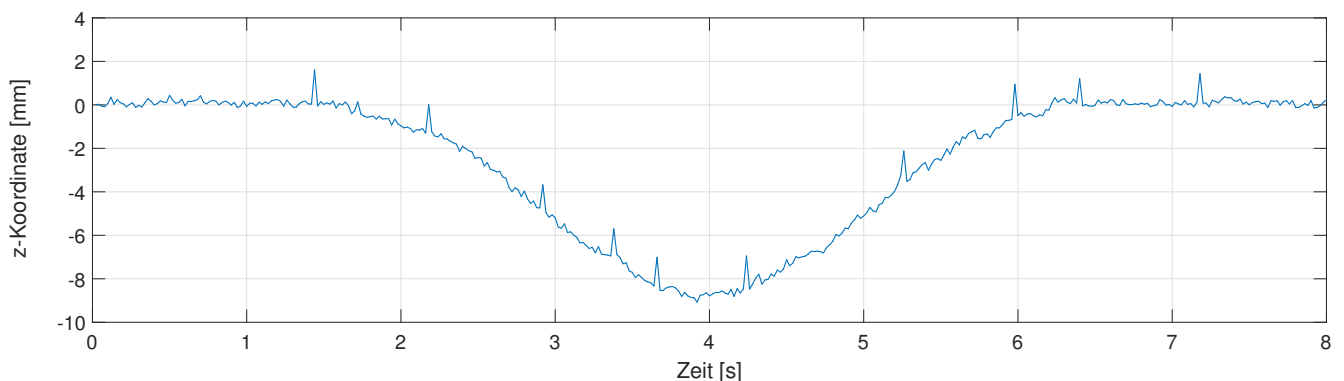
<sup>11</sup> Bei dem untersuchten Gerät tritt ein Encoderticksprung bei knapp 2 % der Profile auf (empirisch bestimmter Wert).



**Abb. 23.a.:** Schematische Darstellung des Einflusses eines Encoderticksprungs auf ein Messprofil.

Der beschriebene Zusammenhang lässt sich anhand einer zeitlichen Abfolge von Messprofilen veranschaulichen. Durch die Betrachtung der Zeitreihe eines Profilmesspunktes innerhalb des in **Abb. 23.a** blau markierten Bereichs des Brückenprofils, kann insbesondere der Unterschied zwischen betroffenen und nicht betroffenen Messprofilen verdeutlicht werden.

Dazu ist in **Abb. 23.b** die Zeitreihe der z-Koordinate des Profilmesspunktes während einer Verformung dargestellt. Durch die Rotationsgeschwindigkeit von knapp 50 Hz ergeben sich für den dargestellten Zeitbereich von 8 Sekunden ca. 400 Messprofile. Die auftretende Verformung hat zum Zeitpunkt 4 Sekunden ihr Maximum erreicht. Zusätzlich zu dieser niederfrequenten Deformation treten zehn hochfrequente isolierte Unstetigkeiten mit positivem Vorzeichen auf, bei denen es sich um die Auswirkung von Encoderticksprüngen auf die z-Koordinate des Profilmesspunktes handelt.



**Abb. 23.b.:** Zeitreihe der z-Koordinate eines Profilmesspunktes innerhalb des in **Abb. 23.a** blau markierten Bereichs mit Unstetigkeiten aufgrund von Encoderticksprüngen.

Bei den von einem Encoderticksprung verfälschten Profilen sind die, den Distanzmessungen zugeordneten Encodertickwerte grundsätzlich zu groß. Deshalb haben alle dadurch verursachten Unstetigkeiten dasselbe Vorzeichen. Basierend auf der Bogenformel führt eine Verkipfung von  $+ 0,0088$  Grad bei einer Distanz zwischen Instrument und Tragwerksoberfläche von 12,5 m zu einer Verfälschung des Messpunktes von ca. 2 mm senkrecht zur Messrichtung. Unter Berücksichtigung der entsprechenden Projektion in die Verti-

kale mit einer Winkelmessung von ca. 45 Grad kann die zu erwartende Auswirkung auf die z-Koordinate für jeden Messpunkt im Profil berechnet werden und beträgt an der ausgewählten Messstelle ca. + 1,4 mm.

Zur Korrektur der Encoderticksprünge wurde ein auf den Profilmesspunkten basierender Korrekturansatz entwickelt, bei dem die Korrektur direkt beim Datenexport durchgeführt werden kann. Dazu werden die Encodertickwerte der ersten Punkte in jedem Messprofil analysiert.

Da genauso wie auf die ursprünglichen Beobachtungen, auch auf die Encodertickwerte keine Zugriffsmöglichkeit besteht, müssen zunächst die entsprechenden Winkelwerte aus den Koordinaten der Profilmesspunkte berechnet werden. Anschließend können diese Winkelwerte um das Kalibrieroffset aufgrund der Indexabweichung des Encoders reduziert werden. Die gesuchten Encodertickwerte ergeben sich somit durch:

$$\text{Encodertickwert} = (\text{berechneter Winkelwert} - \text{Kalibrieroffset}) \cdot \frac{40960 \text{ Punkte}}{360 \text{ Grad}}. \quad (24)$$

Bei einer Rotationsgeschwindigkeit von 50 Hz könnten die Encodertickwerte beispielsweise die folgenden Werte annehmen: 0, 2, 4, 6, 8, ..., 40.958. Aufgrund von Abweichungen, insbesondere in der Rotationsgeschwindigkeit, variieren diese Werte in der Praxis jedoch, sodass der erste Messpunkt anstatt eines Encodertickwertes von 0 (= 40.960) auch die Werte 1 oder 2 annehmen kann.

Weicht der Encodertickwert des ersten Punktes davon ab, handelt es sich in der Regel um ein Messprofil, das von einem Encoderticksprung betroffen ist. Untersuchungen haben gezeigt, dass insbesondere ein Encodertickwert von 3 als Indikator für einen Encoderticksprung angesehen werden kann, da etwa 75 %<sup>12</sup> der von einem Encoderticksprung betroffenen Messprofile diesen Wert für den ersten Messpunkt aufweisen. Durch diesen Zusammenhang kann somit ein Großteil der Encoderticksprünge aufgedeckt und durch die Reduktion aller Winkelwerte des Profils um das Winkelinkrement eines Encoderticks (0,0088 Grad) korrigiert werden.

In den restlichen 25 % der von einem Encoderticksprung betroffenen Messprofile weist der erste Punkt einen Encodertickwert von 2 auf. Dieser Wert ist jedoch kein absolutes Indiz für eine falsche Zuweisung, da dieser Wert auch bei nicht verfälschten Messprofilen vorkommt. Diese Information ist demnach nicht eindeutig zur Erkennung von verfälschten Messprofilen verwendbar, kann jedoch als Vorauswahl für weiterführende Analysen genutzt werden.

Für eine zukünftige vollautomatische Aufdeckung von Encoderticksprünge ist die Ableitung weiterer Muster in den Encodertickwerten notwendig. Jedoch konnten entsprechende Muster nur für das verwendete Instrument nachgewiesen werden, nicht aber für andere Z+F Profiler.

Eine vollständige automatische Aufdeckung kann somit bis dato nicht realisiert werden, aber mit dem hier vorgestellten Ansatz kann bereits ein Großteil der Encoderticksprünge korrigiert werden. Ergänzend dazu wird in Abschnitt 3.3 eine Methode vorgestellt, die restlichen Encoderticksprünge auf Basis abgeleiteter Messgrößen im Rahmen der Überwachung von Tragwerken mit einer speziellen Prozessierung zu erkennen und zu korrigieren.

<sup>12</sup> Für das untersuchte Instrument bei einer Messgeschwindigkeit von 50 Hz geltender, empirisch bestimmter Wert.

---

## 2.3 Unsicherheit von Profilsclannermessungen

---

Bei berührungslosen Messsystemen, wie TLS, sind neben den Einflüssen der Umgebungsbedingungen auch die Oberflächeneigenschaften des Messobjektes entscheidende Faktoren bei der Bestimmung der Unsicherheiten. Während sich beim 3D-TLS die Quantifizierung der Unsicherheiten aus Messungen im Wesentlichen auf den epochenweisen Vergleich verschiedener Scans beschränkt, ergeben sich beim Profilsclanning aufgrund der hochfrequenten wiederholten Erfassung von Messprofilen weitere Möglichkeiten zur Quantifizierung und Verifizierung von Unsicherheiten.

Durch die nahezu zeitkontinuierliche Erfassung können zeitliche Variationen in den Einflüssen der Umgebungsbedingungen und den Oberflächeneigenschaften der Messobjekte im Rahmen von Zeitreihenanalysen bestimmt und für die Verifizierung von Unsicherheiten genutzt werden.

Da durch den Einsatz von Profilsclannern die Erfassung von zeitlich-veränderlichen Messobjekten ermöglicht wird, müssen konsequenterweise für die dabei bestimmten zeitabhängigen Koordinaten entsprechende Unsicherheiten angegeben werden.

Beim grundlegenden Aufbau eines Profilsclanners handelt es sich um eine reduzierte Form eines 3D-TLS. Somit entsprechen die potenziell auftretenden Messunsicherheiten einer Untergruppe der Messunsicherheiten bei 3D-TLS. Theoretische Abhandlungen bezüglich dieser Messunsicherheiten finden sich beispielsweise in [Gor08], [Res06], [Sou+11] und [Hol+16]. Ergänzend dazu wird in [Sch17] speziell die Interaktion zwischen Laserstrahl und angemessener Objektoberfläche mit einer Simulationsumgebung untersucht.

Da das Verfahren der berührungslosen Distanzmessung prinzipiell mit den Verfahren tachymetrischer Messungen übereinstimmt, können auch die dort auftretenden Messunsicherheiten auf die Verwendung von TLS übertragen werden, siehe z. B. [JSH08].

Im Folgenden werden zunächst epochenbasierte Ansätze zur Unsicherheitsbestimmung für 3D-TLS betrachtet, bevor in Abschnitt 2.3.2 zur nahezu kontinuierlichen Erfassung und somit zur Zeitreihenanalyse übergegangen wird. Da im Rahmen von Überwachungsmessungen die Koordinaten an sich nicht zwingend von Interesse sind, sondern oft lediglich deren Änderungen betrachtet werden, findet im Folgenden keine explizite Unterscheidung zwischen der Bestimmung der Unsicherheit von Koordinatendifferenzen und der Bestimmung der Koordinatenunsicherheit statt.

---

### 2.3.1 Unsicherheitsbestimmung bei 3D-TLS

---

Grundsätzlich gilt: „Ein Messergebnis wird erst dann als vollständig angesehen, wenn es mit einer quantitativen Angabe zur Genauigkeit bzw. Unsicherheit versehen ist. Für die geodätische Praxis von besonderem Interesse sind Unsicherheitsmaße [...] unabhängig davon, ob sie sich auf ursprüngliche oder abgeleitete Größen wie z. B. Punktkoordinaten beziehen.“ [KS04].

Diese Anforderung lässt sich direkt auf TLS übertragen, da oft nur abgeleitete kartesische Koordinaten im Koordinatensystem des TLS und nicht die originären Messelemente zur Verfügung stehen. Die Messunsicherheiten werden hingegen vom Hersteller meist für die originären Messelemente (Winkel- und Distanzmessung) angegeben, siehe **Tab. 8**.

Um dennoch Unsicherheiten für die Messpunkte zu erhalten, kann eine (theoretische) Unsicherheitsfortpflanzung der Herstellerangaben durchgeführt werden. Dabei stellt sich jedoch die Frage, wie realitätsnah diese Angaben sind und inwieweit sich die Einflüsse der Umgebungsbedingungen und Oberflächeneigenschaften bei praktischen Messungen auswirken. Problematisch ist auch die willkürliche Messpunktauswahl bei TLS, wodurch die Messpunkte in verschiedenen Scans nicht reproduzierbar sind, was eine Verifizierung der Unsicherheiten zusätzlich erschwert.



---

Zur Ableitung realistischer Unsicherheitsangaben für die Messergebnisse im praktischen Einsatz kommen bisher für 3D-TLS u. a. die folgenden Ansätze zum Einsatz:

1. Eine möglichst realitätsnahe Unsicherheitsfortpflanzung durch aufwendige Modellierung von Scanner-, Umwelt- und Objekteigenschaften sowie der jeweiligen Messgeometrie in Kombination mit Labormessungen. Laut [Wuj+17] wurden in den letzten Jahren jedoch insbesondere bezogen auf das stochastische Modell von TLS keine relevanten Ergebnisse veröffentlicht.
2. Unsicherheitsbestimmung durch einen „integralen“ Faktor, wie z. B. durch die Bestimmung eines Zusammenhangs zwischen gemessenen Intensitäten des reflektierten Laserstrahls und der Streuung von Distanzmesswerten. Die Variationen in der Intensität werden dabei als Variationen von Umwelt- und/oder Objekteigenschaften interpretiert.
3. Epochenweiser Vergleich von begrenzten Objektoberflächen, der durch Lösen einer Approximationsaufgabe unter Verwendung der in diesem Teil der Objektoberfläche enthaltenen Messpunkte durchgeführt wird.

Die detaillierte Beschreibung und Bewertung dieser Ansätze bildet den Ausgangspunkt für die anschließende Diskussion der Unsicherheitsbestimmung bei Profilsclannern.

---

#### 2.3.1.1 Varianzfortpflanzung der Winkel- und Distanzmessunsicherheiten

---

Die Bestimmung von Koordinatenunsicherheiten erfolgt im Allgemeinen durch Fortpflanzung der Messunsicherheiten in den originären Messungen und den Abweichungen des definierten Koordinatensystems. Dazu muss ein mathematisches Modell des TLS aufgestellt werden, das üblicherweise auf dem Formelzusammenhang des polaren Anhängens basiert. Nach [Gor08] wird dieses mathematische Grundmodell um einen „Großteil aller theoretisch denkbaren geometrischen und physikalischen Ursachen“ erweitert und dient als (vollständiger) funktionaler Zusammenhang zwischen den exportierten Scandaten und den originären Winkel- und Distanzmessungen.

Die folgende nicht abschließende Liste möglicher Einflussgrößen, die zur Aufstellung eines vollständigen funktionalen Zusammenhangs berücksichtigt werden müssten, verdeutlicht die Problematik der Varianzfortpflanzung für TLS, da ein Großteil der Ursachen nicht bzw. kaum quantifizierbar ist. Im Anhang A.1 findet sich eine ausführliche Beschreibung dieser möglichen Einflussgrößen sowie eine Diskussion deren Relevanz beim Einsatz von Profilsclannern für die Überwachung von Tragwerken.

1. Konstruktionsbedingte Abweichungen des definierten Koordinatensystems:
  - Indexabweichung:
    - Fehlerhafter Einbau des Winkelencoders,
    - Horizontaler Winkelversatz der Spiegelrotationsachse.
  - Zielachsabweichung:
    - Abweichung vom 45°-Winkel des Spiegels,
    - Vertikaler Winkelversatz der Spiegelrotationsachse,
    - Vertikaler Parallelversatz der Spiegelrotationsachse.
2. Konstruktionsbedingte Messabweichungen:
  - Scannerspezifische Nullpunktskorrektur:
    - Geräteinterner Totweg des Messlasers,

- Horizontaler und vertikaler Parallelversatz der Spiegelrotationsachse.
- Maßstabsfaktor.

### 3. Atmosphärenbedingte Messabweichungen:

- Variierende Ausbreitungsgeschwindigkeit des Messlasers,
- Refraktion.

### 4. Objektbedingte Messabweichungen:

- Auftreffwinkel,
- Mixed Pixel Effekt,
- Reflektivität der Oberfläche,
- Eindringtiefe des Laserstrahls.

Zusätzlich zum funktionalen Zusammenhang wird ein stochastisches Modell benötigt, das laut [Gor08] bei TLS „die Genauigkeit der beobachteten Laserscannerpunkte im Hinblick auf die Faktoren Messentfernung, Strahlauftreffwinkel und Oberflächenbeschaffenheit modelliert“.

In der Summe müssen so nicht nur die oben aufgeführten systematischen Messabweichungen, sondern auch zufällige Messabweichungen modelliert werden, die jedoch kaum quantifiziert werden können. Insbesondere die objekt- und atmosphärenbedingten Messabweichungen sind selbst innerhalb einer definierten Messumgebung äußerst variabel. Eine Übertragung der Ergebnisse auf andere Messszenarien ist kaum möglich, da bei den oft zugrunde liegenden Laboruntersuchungen einerseits die Rahmenbedingungen (räumliche Ausdehnung, Temperaturbereich, Lichtverhältnisse, Oberflächen, usw.) stark eingeschränkt sind, andererseits oft auch spezielle Konfigurationen verwendet werden, um gezielt Effekte zu reduzieren. Ansonsten wäre eine getrennte Betrachtung der oben aufgeführten Einflussgrößen nicht möglich.

Die Forderung der klassischen Fehlerbetrachtung, bei der systematische Messabweichungen nicht betrachtet, sondern lediglich zufällige Messabweichungen modelliert werden, lässt sich somit kaum erreichen. Auch nach einer sorgfältigen Korrektur und Reduktion der Messdaten sind noch systematische Effekte vorhanden. Eine vollständige Abspaltung dieser systematischen Effekte ist nicht möglich, da keine quantifizierbaren Erkenntnisse vorliegen oder ein unverhältnismäßig hoher Aufwand betrieben werden müsste, um entsprechende Erkenntnisse zu gewinnen, siehe auch [Heu+13]. Somit wird der wahre Wert bei einer realitätsnahen Sicht nie gleich dem Erwartungswert sein.

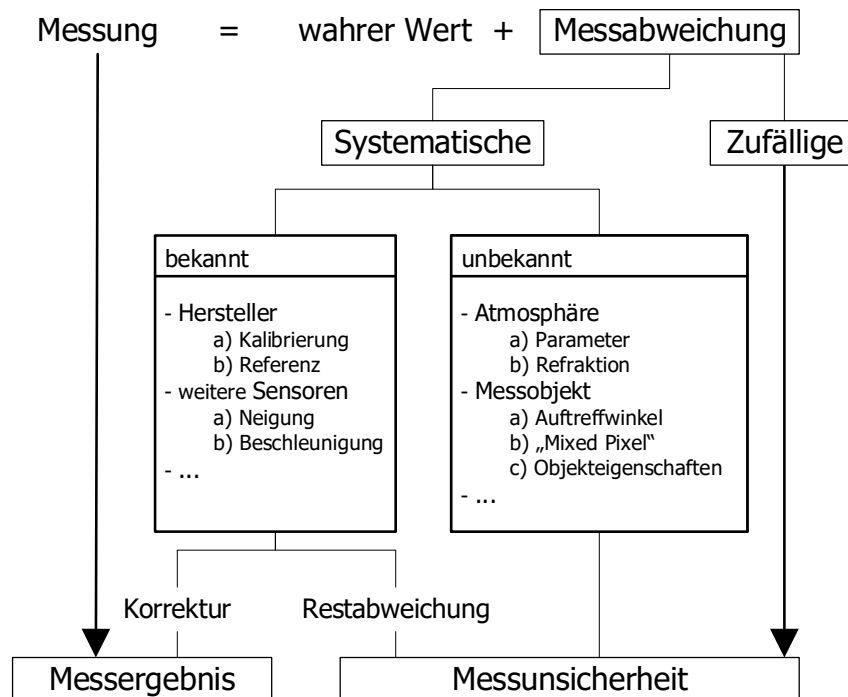
Der Umgang mit systematischen Messabweichungen ist zentrales Thema des Guide to the Expression of Uncertainty (GUM), siehe [ISO95], wobei den nach der Kalibrierung verbleibenden systematischen (Rest)Effekten ein zufälliger Status zuerkannt wird. Dies ist streng betrachtet nur dann gültig, wenn diese Effekte von ihrer Größenordnung und ihrem Verhalten den zufälligen Fehlern entsprechen. In **Abb. 28** sind der Messprozess eines TLS und die entsprechenden Unsicherheiten in Anlehnung an [ISO95] dargestellt.

Dabei finden Teile von systematischen Messabweichungen Eingang in die Bestimmung der Messunsicherheit. Bei diesen wird unterschieden zwischen bekannten systematischen Abweichungen, die (bis auf verbleibende Restabweichungen) korrigiert werden können und unbekannten systematischen Messabweichungen, die nicht erfassbar sind. Diese unbekannten systematischen Abweichungen gehen dementsprechend mit vollem Betrag in die Bilanz der Messunsicherheit ein.

Bei der Anwendung dieses Ansatzes zur Unsicherheitsmodellierung von TLS zeigen sich entsprechende grundlegende Probleme, da die existenten systematischen Messabweichungen keine exakte Modellierung zulassen. Die daraus entstehenden Modellfehler müssten über Annahmen aufgefangen werden. Solche Annahmen können jedoch lediglich für spezielle Messkonfigurationen getroffen werden und sind daher



nicht allgemeingültig. Darüber hinaus fehlen zur Unsicherheitsmodellierung Informationen über die Variation der Parameter am realen Objekt.



**Abb. 28.:** Klassifikation des Messprozesses unter Berücksichtigung zufälliger und systematischer Messabweichungen.

Diese Aussagen werden u. a. von [Gor08] gestützt. In den dort durchgeführten Untersuchungen wurden Ansätze zur Modellierung des Messunsicherheitsbudgets eines TLS nach GUM entwickelt. Dabei wird angemerkt, dass „eine Messunsicherheitsgröße in der Form eines global gültigen Wertes [...] nicht bestimmt werden“ kann.

Auch in [Wuj+17] wird zusammenfassend festgestellt, dass eine getrennte Bestimmung von unterschiedlichen Einflussfaktoren nicht praktikabel ist, da der Großteil der Effekte nicht bekannt ist und daher nicht modelliert werden kann.

Aufgrund der zuvor ausgeführten Problematiken ist die Modellierung des Gesamtsystems TLS im Rahmen einer Varianzfortpflanzung von Winkel- und Distanzmessunsicherheiten als wenig Erfolg versprechend anzusehen, was durch das Fehlen einer erfolgreichen allgemeingültigen Umsetzung zusätzlich unterstrichen wird.

### 2.3.1.2 „Integrale“ Unsicherheitsbestimmung

Da die Modellierung von TLS als Gesamtsystem über eine Varianzfortpflanzung auf Basis getrennt erfasster Effekte entsprechend den vorangegangenen Ausführungen wenig erfolgsversprechend ist, gehen aktuelle Ansätze eher dazu über, die Bestimmung von Unsicherheiten bei TLS auf einen integralen Faktor zu beschränken. Im besten Fall erfasst ein solcher integraler Faktor alle Effekte, die auf das Gesamtsystem wirken. In der Realität werden damit jedoch eher einzelne Komponenten des TLS bzw. einzelne Unsicherheitsanteile modelliert.

Zur Generierung eines stochastischen Modells für einen Z+F Imager 5006h wird z. B. in [Wuj+17] ein entsprechender funktionaler Zusammenhang zwischen Intensität und Distanzrauschen verwendet.

---

Dazu werden unter Laborbedingungen hochfrequente Distanz- und Intensitätsmessung eines Punktes im experimentellen 1D-Modus, d. h. bei abgeschalteter Rotation der Ablenkeinheit durchgeführt.

Die daraus gewonnenen Ergebnisse werden in einer Lookup-Tabelle zusammengefasst, in der zu jedem Intensitätswert ein Wert für die Unsicherheit der Distanzmessung hinterlegt ist. Sämtliche Einflüsse während der Messung werden auf den Intensitätswert zurückgeführt und es wird unterstellt, dass die Intensitätsänderungen nur durch variierende atmosphärische und objektbezogene Einflüsse verursacht werden, die bei der „Laborkalibrierung“ erfasst wurden.

Die durchgeführte Unsicherheitsbestimmung gilt zunächst nur für die Distanzmessung. Die Übertragung auf Koordinatenunsicherheiten wird anschließend über die Herstellerangaben bezüglich der Winkelunsicherheit realisiert. Inwieweit dieser bei Z+F Geräten als RMS angegebene Wert realitätsnahe Aussagen erlaubt, wurde nicht weiter untersucht.

Kernpunkt dieses Ansatzes ist, dass der funktionale Zusammenhang zwischen Intensität und Distanzrauschen nicht von geräteinternen Parametern (wie der Temperatur, usw.) abhängt. Ein solcher Effekt konnte jedoch in den Untersuchungen von [Zám+14] im Profilmodus nachgewiesen werden und führte zu einer 10-prozentigen Abnahme der Intensität über die Zeit, obwohl dasselbe Ziel angemessen wurde. Sollte eine solche Abhängigkeit auch für den 3D-Modus bestehen, würde dies die Unsicherheitsmodellierung entsprechend verfälschen.

Der hier vorgestellte Ansatz, bei dem die Distanzmessung quasi als Blackbox betrachtet wird, liefert für die Distanzmessung von 3D-TLS erfolgsversprechende Ergebnisse, siehe [Wuj+17] und [Wuj+18]. Aufgrund der epochenweisen Erfassung von 3D-TLS bietet er jedoch keine Kontrollmöglichkeit der Unsicherheitsbestimmung am realen Objekt, weswegen sich der Anwender vollkommen auf die Laborkalibrierung und die damit erfassten Effekte verlassen muss.

---

### 2.3.1.3 Unsicherheitsbestimmung durch die Modellierung finiter geometrischer Ersatzelemente

---

Der dritte Ansatz zur Unsicherheitsbestimmung kann direkt am realen Messobjekt eingesetzt werden. Dabei wird die Punktwolke in Klassen mit a priori definierter Ausdehnung (Cluster) eingeteilt, siehe auch [Heu+13, S. 655 f.]. In allen geeigneten Klassen wird eine Modellierung finiter geometrischer Ersatzelemente zur lokalen Oberflächenapproximation durchgeführt. Aus den Residuen der Messpunkte innerhalb der Klasse zum geometrischen Ersatzelement kann die Unsicherheit der Punktwolke bestimmt werden.

Die Einsatzmöglichkeit dieses Ansatzes wird durch die Strukturierung der Oberfläche limitiert, da nur wenn eine sinnvolle Approximation mit Ersatzelementen möglich ist, realitätsnahe Ergebnisse erreicht werden können. Somit eignet sich dieser Ansatz aufgrund der Homogenität ihrer Oberflächen hauptsächlich für künstliche Strukturen. Die so bestimmte Unsicherheit setzt sich dabei grundsätzlich aus der Mess- und Modellunsicherheit zusammen.

Im einfachsten Fall handelt es sich bei dem geometrischen Ersatzelement um eine Ebene, bei der die Unsicherheitsbestimmung auf Basis der Streuung der Punkte in der Koordinatenrichtung senkrecht zur gewählten Ebene stattfindet. Zur Extraktion der benötigten Ebenen aus der Punktwolke kann eine „Kachelung“ z. B. nach [BWF17] verwendet oder der Ansatz nach [JPP15] verfolgt werden.

Die so bestimmte Koordinatenunsicherheit hängt in erster Linie von der Eignung der „Ebene“ ab, d. h., wie stark sich der Punktwolkenausschnitt einer „idealen“ Ebene im Rahmen der Messunsicherheit annähert. Bei einem weniger geeigneten Ausschnitt wird der bestimmte Unsicherheitsbetrag aufgrund von Systematiken zu groß geschätzt.

Erfüllt der Ausschnitt die Anforderung im Rahmen der Messunsicherheit, können die räumlichen Korrelationen (siehe Abschnitt 2.2.1) zwischen den Messpunkten dazu führen, dass zu optimistische Unsicherheitsbeträge bestimmt werden. Da der Ansatz direkt am realen Messobjekt durchgeführt wird, besteht jedoch insgesamt die Möglichkeit, realitätsnahe Unsicherheitsgrößen zu bestimmen.

---

#### 2.3.1.4 Zusammenfassende Beurteilung der Ansätze

---

Wie die ersten beiden Ansätze zeigen, wird vielfach versucht, die Ergebnisse von Laboruntersuchungen auf den praktischen Messeinsatz zu übertragen, siehe z. B. [ZN17]. Es zeigt sich, dass dieses Vorgehen in der Regel nur sehr bedingt geeignet ist, da die Menge an Einflussfaktoren und ihre Variabilität beim Einsatz unter realen Messbedingungen kaum mit vertretbarem Aufwand erfasst bzw. modelliert werden kann. In der Realität variieren sowohl die Umgebungsbedingungen (Atmosphäre) als auch die Eigenschaften des Messobjektes (unterschiedliche Materialien, Auftreffwinkel, Eindringtiefe, usw.). Eine realitätsnahe Bestimmung der Koordinatenunsicherheit ist daher, wenn überhaupt, nur sehr eingeschränkt möglich. Der Übergang von der getrennten Modellierung aller Einflüsse zu einer integralen Betrachtungsweise (Ansatz 2) reduziert die Komplexität der Problemstellung deutlich, sodass erste vielversprechende Ergebnisse realisiert werden konnten. Dieser Ansatz ist jedoch weiterhin abhängig von Laboruntersuchungen und nur die dort erfassten Effekte können entsprechend modelliert werden.

Der Vorteil des dritten Ansatzes liegt darin, dass er direkt an realen Messobjekten anwendbar ist und auf eine aufwendige Laboruntersuchung verzichtet werden kann. Die Koordinatenunsicherheit wird dabei direkt aus der Summe aller Einflüsse auf den Messvorgang am realen Messobjekt bestimmt. Falls die geforderten Voraussetzungen erfüllt werden, kann somit direkt eine Messunsicherheit abgeschätzt werden. Insgesamt gesehen sind alle bisherigen Ansätze für TLS von Annahmen am Objekt bzw. Laboruntersuchungen abhängig. Eine darüber hinausgehende Verifikation unter realen Messbedingungen findet üblicherweise nicht statt, da der Aufwand für solche Untersuchungen in der Regel zu groß ist.

---

#### 2.3.2 Bestimmung der Koordinatenunsicherheit bei Profilsclannern

---

Da es sich bei Profilsclannern um eine Teilmenge von TLS handelt, lassen sich alle bisherigen Ausführungen zu den Problematiken bei der Unsicherheitsbestimmung auf die Situation beim Profilsclanning formal übertragen. Dies gilt auch, wenn die Betrachtungsweise des Messprozesses von einer epochenweisen Erfassung von Messobjekten ausgeht, die sich im Rahmen der Messdauer hinreichend in Ruhe befinden.

Durch die Reduktion der räumlichen Auflösung (d. h. lediglich Messung in einer Ebene) ist die profilweise Erfassung der Objektoberfläche mit einer hohen Wiederholfrequenz möglich, was wiederum die geometrische Bestimmung bewegter Objektoberflächen ermöglicht. Durch diese nahezu zeitkontinuierliche Erfassung kann die Auswertung um die zeitliche Komponente erweitert werden und so auf eine kinematische Betrachtungsweise der Messobjektdeformation übergegangen werden.

Aus der dadurch möglichen Erweiterung des Anwendungsbereichs folgt, dass auch die Koordinatenunsicherheiten beim Einsatz eines Profilsclanners für die Überwachung von Tragwerken prinzipiell aus der kinematischen Betrachtungsweise abgeleitet werden können. Dies schließt den Sonderfall einer sich hinreichend in Ruhe befindlichen Objektoberfläche mit ein.

Da beim Profilsclanning die Objektoberfläche üblicherweise mit einer Messfrequenz erfasst wird, die um ein vielfaches höher ist als deren Bewegungsgeschwindigkeit, können Zeitreihen von Ausschnitten der Objektoberflächen erfasst werden, deren Parameter sich mit hoher statistischer Sicherheit bestimmen lassen.

Aufgrund der inhärenten Problematik nicht reproduzierbarer Messpunkte müssen jedoch für die Umsetzung einer anwendungsorientierten Bestimmung von Koordinatenunsicherheiten geeignete räumliche Prozessierungsansätze gefunden werden, mit denen die Ausschnitte der Objektoberfläche approximiert werden. Darauf aufbauend können entsprechend der Diskussion in [KS04], Koordinatenunsicherheiten auf Basis dieser Zeitreihen generiert werden.

---

Durch diese nahezu zeitkontinuierliche Erfassung der Objektoberfläche beim Profilschanning ergeben sich auf Basis von Zeitreihenanalysen erweiterte Möglichkeiten zur Bestimmung und Verifizierung von Koordinatenunsicherheiten. Bei sich hinreichend in Ruhe befindlichen Objektoberflächen reichen einfache Zeitreihenanalysen aus, um Aussagen über die Koordinatenunsicherheiten zu erhalten oder bereits verfügbare zu verifizieren. Dagegen können deterministisch bzw. stochastisch angeregte Objektoberflächen zu instationären Zeitreihen führen, aus den sich jedoch Koordinatenunsicherheiten mit der sogenannten Multiskalenanalyse (Wavelet-Transformation) ableiten lassen, siehe Abschnitt 3.3.4.

Beim Profilschanning wird der Begriff der Koordinatenunsicherheit dementsprechend als Variation von approximierten Teilen der Objektoberfläche über die Zeit definiert. Befindet sich die Objektoberfläche hinreichend in Ruhe, so können diese Variationen direkt als Koordinatenunsicherheit interpretiert werden. Bei sich in Bewegung befindlichen Objektoberflächen muss zunächst die Separierung von Messrauschen und Objektbewegungen im Rahmen einer Multiskalenanalyse erfolgen. Bei instationären Zeitreihen, die durch stochastische Anregungen verursacht werden, können über Betrachtungen in der Zeit-Frequenz-Ebene sogar temporäre Koordinatenunsicherheiten abgeleitet werden.

Die Zielstellung ist somit eine in situ Unsicherheitsbestimmung, bei der alle auf den Messprozess wirkenden Einflüsse erfasst werden. Im Idealfall wird parallel zu den eigentlichen Messungen auch die zugehörige Messunsicherheit für die entsprechende Konfiguration aus Messobjekt und Messsystem bestimmt. Dies entspricht prinzipiell einem „integralen“ Ansatz, da so sämtliche Einflussgrößen auf die jeweilige Messgröße in die Unsicherheitsbestimmung mit eingehen.

Durch die Kombination aus räumlicher und zeitlicher Auflösung kann der Messprozess bei Profilschannern somit auch als eine kontinuierliche raumzeitliche Erfassung interpretiert werden. In Kapitel 3 werden die Messprofile dementsprechend bezüglich ihrer räumlichen und zeitlichen Charakteristik (Diskretisierung) prozessiert, um so eine optimale Bestimmung von abgeleiteten Tragwerkspunkten und Unsicherheitsmaßen zu erhalten. Dabei wird insbesondere auch der Forderung (siehe [Heu+13, S. 663]) nach einer automatisierten, effizienten Auswertung Rechnung getragen, da nicht nur die Datenaufbereitung stattfindet, sondern auch Ausreißer und Datenlücken in den Messprofilen bzw. Zeitreihen erkannt und kompensiert werden. Dies wird insgesamt auch durch die gekoppelte Betrachtungsweise der zeitlichen und räumlichen Komponente ermöglicht, da so eine gegenseitige Verifizierung der Ergebnisse durchgeführt werden kann.



---

### 3 Raumzeitliche Prozessierung von Profilsclannermessungen

---

Der Profilsclanner bestimmt für die in einem Scan erfassten Messpunkte jeweils eine räumliche und eine zeitliche Komponente, was einer raumzeitlichen Erfassung des Tragwerks entspricht. Die Untersuchungen in Kapitel 2 haben jedoch gezeigt, dass die originären Messwerte des Profilsclanners nicht unmittelbar für die Überwachung von Tragwerken verwendet werden können, da sie einerseits nicht direkt zugänglich und andererseits auch nicht reproduzierbar sind.

Die in Profilen organisierten Messwerte müssen daher vielmehr im Kontext der Tragwerksoberfläche und lokalen Gegebenheiten analysiert werden. Aufgrund der Vielzahl der zu einem Scan gehörenden Messprofile kann diese Analyse aus Effizienzgründen nur automatisiert erfolgen.

Das Endergebnis der Analyse ist ein aus dem Messprofil abgeleitetes Tragwerksprofil, das nur noch aus Punkten besteht, die hinsichtlich der Tragwerksoberfläche relevant sind. Darauf basierend kann eine automatische Segmentierung des Messprofils durchgeführt werden, die sich an der Struktur der Tragwerks-oberfläche orientiert. Abschnitt 3.1 legt zunächst die Anforderungen an die Analyse der Messprofile fest, beschreibt die Realisierung eines entsprechenden automatischen Analysealgorithmus und zeigt dessen Anwendung bei der Analyse von Messprofilen.

In Abschnitt 3.2 werden mögliche Verfahren zur räumlichen Prozessierung der erfassten Tragwerkspunkte diskutiert und deren Anwendung demonstriert. Räumliche Prozessierung bedeutet dabei den profilweisen bzw. bei Vorliegen eines segmentierten Tragwerksprofils den segmentweisen Einsatz dieser Verfahren zur Approximation der Tragwerkspunkte. Da jedes Profil oder jedes Profilsegment einen Zeitstempel besitzt, stehen im Ergebnis der räumlichen Prozessierung Zeitreihen von approximierten Tragwerkspunkten zur Verfügung, auf deren Basis eine zeitliche Prozessierung mit Verfahren der Zeitreihenanalyse erfolgen kann.

Die in Abschnitt 3.3 vorgestellte zeitliche Prozessierung hat die vorrangige Zielstellung, die Ergebnisse der räumlichen Prozessierung zu verifizieren. Auf Basis von Zeitreihenanalysen werden Ausreißer und systematische Effekte automatisch detektiert und entweder korrigiert oder aus der Zeitreihe entfernt. Abschließend wird auf Basis dieser bereinigten Zeitreihen die Bestimmung der Koordinatenunsicherheiten der Tragwerkspunkte durchgeführt bzw. verifiziert.

In Abschnitt 3.4 werden die Ansätze zur kombinierten räumlichen und zeitlichen (raumzeitlichen) Prozessierung von Profilsclannermessungen zusammengefasst. Diese können als Ausgangspunkt für Untersuchungen genutzt werden, die das Deformationsverhalten von Tragwerken sowohl räumlich als auch zeitlich optimal erfassen und bilden somit die Basis für die Überwachung von Tragwerken.

---

#### 3.1 Automatische Analyse von Messprofilen

---

Das grundlegende Ziel der automatischen Analyse der Messprofile ist zunächst die Ableitung von Tragwerksprofilen aus den ursprünglichen Messprofilen, d. h. die Extraktion bzw. Erzeugung bereinigter Messprofile, die ausschließlich die Tragwerksoberfläche repräsentieren.

Aufgrund des Messprinzips des Profilsclanners muss jedoch davon ausgegangen werden, dass durch die Aufnahmegeometrie bzw. durch die Umgebungsbedingungen verursachte Fehlmessungen in den Messdaten vorhanden sind. Diese Einflüsse verfälschen die eigentlichen Messungen und erschweren bzw. verhindern die Extraktion der tatsächlichen Tragwerksgeometrie.

---

Werden zunächst „glatte“ Tragwerksoberflächen (wie z. B. Betonoberflächen) betrachtet, treten die durch Fehlmessungen verursachten Effekte als isolierte Unstetigkeitsstellen in den beobachteten Messprofilen auf.

In der Realität sind jedoch meist weitere Unstetigkeiten aufgrund der eigentlichen Oberflächenstruktur des Tragwerkes vorhanden, wie z. B. Kanten, Verstärkungen oder Imperfektionen der Oberfläche.

Die aufgedeckten Unstetigkeiten müssen daher neben der Identifikation auch analysiert werden, wobei entschieden werden muss, ob sie durch:

1. Fehlmessungen aufgrund der Aufnahmegeometrie, atmosphärischer Bedingungen, usw. oder
2. durch konstruktive Details an der Tragwerksoberfläche

bedingt sind.

Falls keine relevanten konstruktiven Details an der Tragwerksoberfläche existieren, kann die primäre Analyse der identifizierten Unstetigkeiten entfallen und der Fokus auf Unstetigkeiten aufgrund von Fehlmessungen gelegt werden.

Ansonsten können die identifizierten Unstetigkeiten, die ihre Ursachen in der eigentlichen Struktur der Tragwerksoberfläche haben, zusätzlich dazu genutzt werden, das abgeleitete Tragwerksprofil in mehrere Segmente zu unterteilen. In diesem Fall wird von einer (komplexen) profilweisen zu einer (einfacheren) segmentweisen Betrachtung übergegangen und so eine angepasstere Aufbereitung der Tragwerksprofile hinsichtlich der weiteren räumlichen Prozessierung (z. B. durch eine geringere Punktzahl oder einfachere Ansatzfunktionen) ermöglicht.

Da die Struktur der Tragwerksoberfläche meist in direktem Zusammenhang mit der tatsächlichen Tragwerksstruktur steht, kann eine solche Segmentierung des Tragwerksprofils auch als eine detailliertere Aufbereitung der real vorhandenen Tragwerksgeometrie betrachtet werden. Dadurch eignet sich diese Aufbereitung zusätzlich für die Bearbeitung weiterer (baudynamischer) Problemstellungen:

- Überprüfung und Modifikation der strukturdynamischen Modellierung des Tragwerks,
- visuelle Tragwerksanalyse (z. B. Deformationsverhalten einzelner Elemente).

Insgesamt betrachtet können diese Anforderungen nur mit einer adaptiven Analyse gelöst werden, die sich an die unterschiedlichen Größenordnungen (Skalen) der oben genannten Effekte bei der Überwachung von Tragwerken anpassen kann.

Zur **Identifizierung** der Unstetigkeiten im Messprofil wird dementsprechend ein Algorithmus realisiert (Abschnitt 3.1.3.1), der auf der Wavelet-Transformation basiert. Die dabei zum Einsatz kommende Multiskalenanalyse hat das geforderte Potenzial, sich an die jeweilige Geometrie der Tragwerksoberfläche bestmöglich anzupassen und ermöglicht aufgrund ihrer skalenweisen Betrachtung der Messprofile darüber hinaus die Erkennung isolierter Unstetigkeitsstellen.

Ähnliche Aufgabenstellungen finden sich bei der Kantendetektion in digitalen Bildern oder bei der Analyse von instationären Zeitreihen. Es ist daher naheliegend, die dort eingesetzten Methoden zur Problemlösung heranzuziehen. Der hier vorgestellte Algorithmus zur automatischen Detektion von Unstetigkeiten orientiert sich an dem in [Bän05] vorgestellten Algorithmus zur Kantendetektion in Bildern und wird in [Neu08] zur Aufdeckung von Mittelwertänderungen in Zeitreihen eingesetzt. Darüber hinaus wird in [JPP15] gezeigt, dass die zweidimensionale Wavelet-Transformation auch zur Extraktion von Ebenen aus Punktwolken geeignet ist.

Die **Analyse** der identifizierten Unstetigkeit (Abschnitt 3.1.3.2) erfolgt im Anschluss durch eine Regressionsanalyse, die die Form der Unstetigkeiten mit definierten Referenzmustern vergleicht, welche die zu bestimmenden Unstetigkeiten charakterisieren.



### 3.1.1 Wavelet-Transformation

Im Folgenden wird kurz auf wichtige Aspekte der Wavelet-Transformation im Hinblick auf die weiteren Ausführungen eingegangen. Prinzipiell handelt es sich dabei um eine Zeit-Frequenz-Transformation, wobei die Einheit des Eingangssignals nicht festgelegt ist. Die Wavelet-Transformation kann entsprechend der vorrangigen Verwendung in diesem Kapitel somit auch als Orts-Frequenz-Transformation eingesetzt werden.

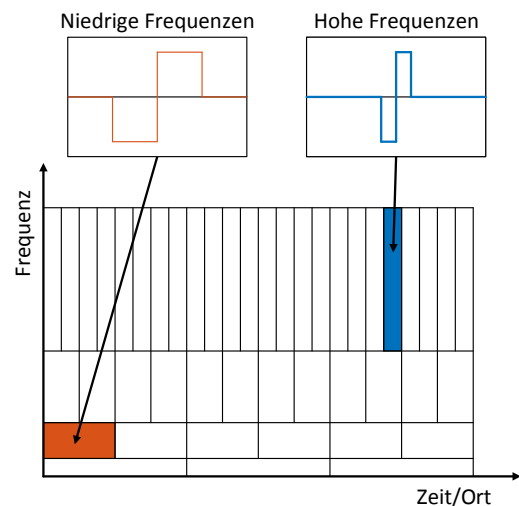
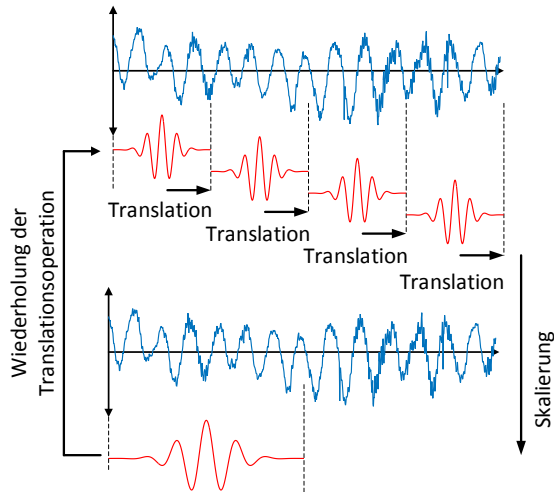
Die kontinuierliche Wavelet-Transformation (CWT, engl.: continuous wavelet transform) ist für eine Ortsfunktion  $f(x)$  gegeben durch

$$W_f(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_{(a,b)}^*(x) f(x) dx, \quad (35.a)$$

wobei  $*$  die komplexe Konjugation bezeichnet. Die Wavelet-Basis  $\psi_{(a,b)}(x)$  wird auf Grundlage eines Mutter-Wavelets  $\psi(x)$  durch Dehnung bzw. Stauchung und Translation erzeugt und ist gegeben durch:

$$\psi_{(a,b)}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right). \quad (35.b)$$

Der Translationsparameter  $b$  bewirkt eine Verschiebung im Ortsbereich. Es wird somit festgelegt, an welcher Position die entsprechende Funktion untersucht wird. Der Skalierungsparameter  $a$  bestimmt die Größe des analysierten Bereiches und führt durch Dehnung bzw. Stauchung der Wavelet-Funktion zu einer Frequenzverschiebung, siehe **Abb. 35.a** und **Abb. 35.b**.



**Abb. 35.a.:** Translation und Skalierung der Wavelet-Funktion.

**Abb. 35.b.:** Zeit-Frequenzebene mit konstanter relativer Frequenzauflösung.

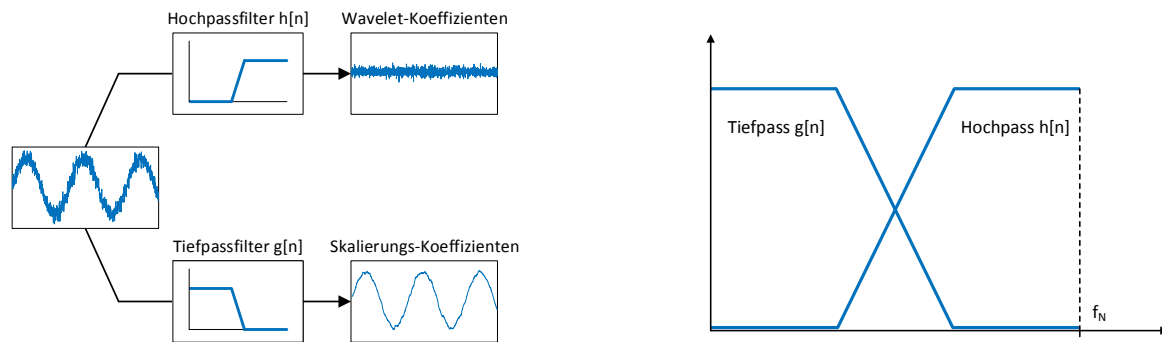
Die Wavelet-Koeffizienten ergeben eine Maßzahl für den Energiegehalt der Funktion im Bereich des Ortes und der Frequenz. Somit können die spektralen Anteile in unterschiedlichen Frequenzbereichen, sowie an unterschiedlichen Positionen wiedergegeben werden, was einer Darstellung in der Orts-Frequenzebene entspricht, siehe **Abb. 35.b**.

Der Übergang zur diskreten Wavelet-Transformation (DWT) ist dadurch motiviert, dass die Messreihen einerseits diskret vorliegen und es andererseits unmöglich ist, unendlich viele Wavelet-Koeffizienten für



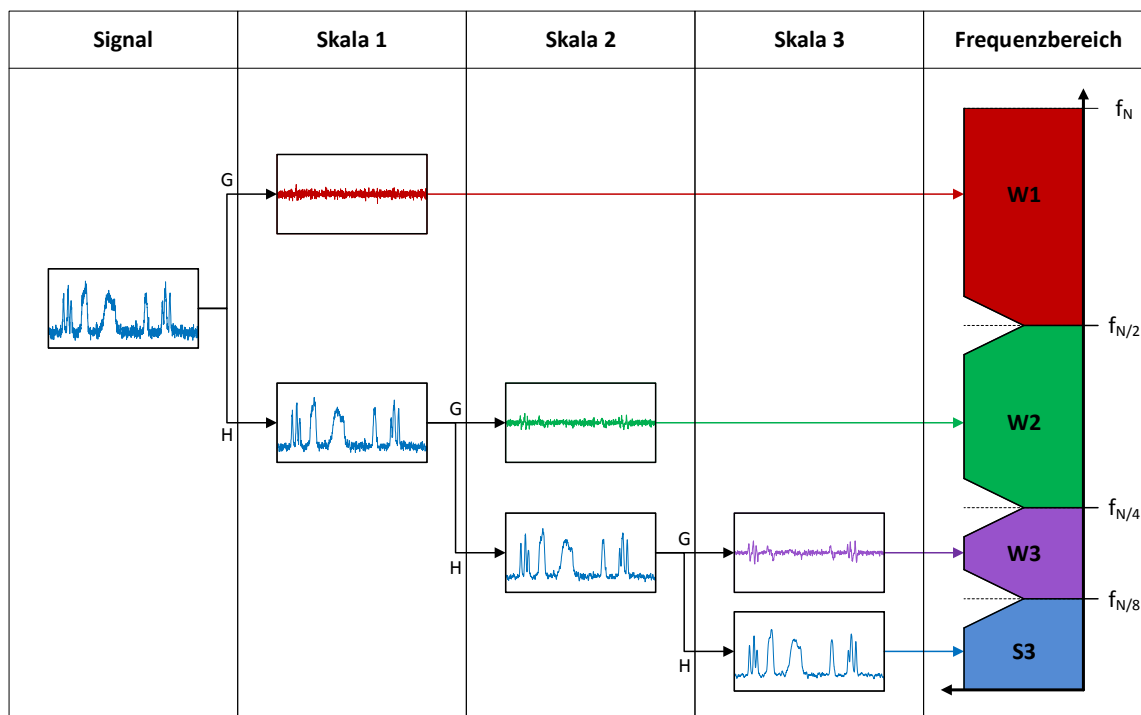
jede mögliche Skalierung und Translation zu berechnen. Für die Umsetzung der DWT findet somit eine Diskretisierung der Orts-Frequenzebene statt, wobei üblicherweise dyadische Skalen  $2^n$  ( $n=1, 2, 3, \dots$ ) und eine in allen Skalen identische Abtastschrittweite verwendet werden.

Basierend auf den Implementierungen nach [Mal89] bzw. [Hol+89] findet die Umsetzung der DWT auf Basis eines Hoch- und Tiefpassfilterpaares statt, siehe **Abb. 36.a**. Ein detaillierter Vergleich der Theorie, die diesen Implementierungen zugrunde liegt, findet sich in [She92].



**Abb. 36.a.:** Hoch- bzw. Tiefpassfilterung des Signals.

Im Rahmen der als **Multiskalenanalyse** bezeichneten iterativen Hoch- bzw. Tiefpassfilterung wird die Signalinformation stufenweise in entsprechende Frequenzbänder aufgeteilt, siehe **Abb. 36.b**. Es entstehen immer schmäler werdende Hochpassanteile (Wavelet-Koeffizienten) und ein einzelner Tiefpassanteil (Skalierungs-Koeffizienten).



**Abb. 36.b.:** Rekursive Anwendung der Filterbank.

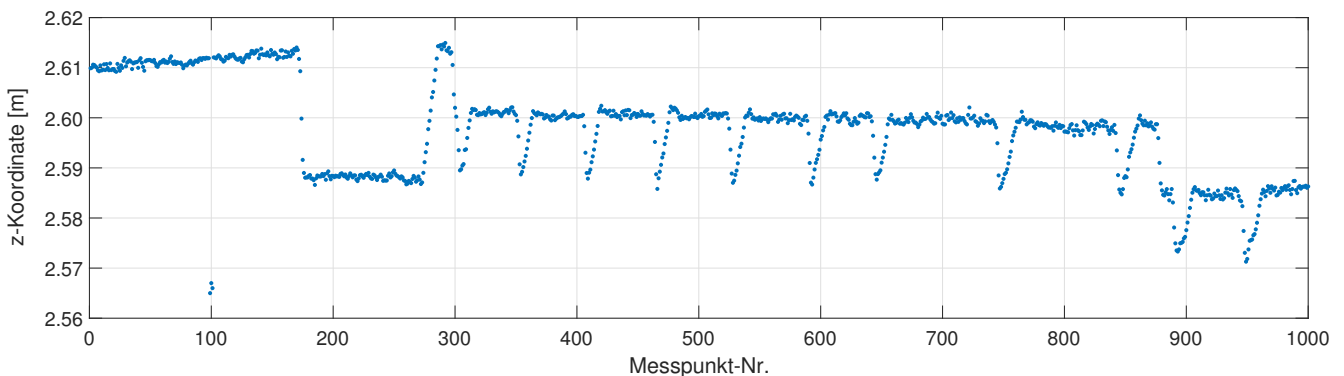
Ergänzend zu diesen Ausführungen werden im Anhang A.2 die Filter des Haar-Wavelets hergeleitet und deren Anwendung anhand synthetischer Beispiele demonstriert.

Darüber hinaus findet sich in [Heu+13, S. 382 ff.] ein anwendungsnaher Einstieg in die Thematik, der

speziell für die Ingenieurgeodäsie aufbereitet ist. In der Dissertationsschrift von [Neu08] werden weitere ingenieurgeodätisch relevante Aspekte behandelt, ebenso wie in [Sch01] und [Kel04]. Eine allgemeine, praktische Einführung für Ingenieure findet sich in [Bän05] und tiefergehende Ausführungen in [PW00]. Die vollständigen, theoretischen Grundlagen sind in [LMR98] bzw. [Dau92] aufbereitet.

### 3.1.2 Anforderungen an den Analysealgorithmus

Die Anforderungen an die Analyse der Tragwerksoberfläche werden aus den zuvor diskutierten Aspekten abgeleitet. Zum besseren Verständnis finden die folgenden Betrachtungen an einem Ausschnitt eines Messprofils am Hauptträger einer Stahlbrücke statt, siehe **Abb. 37**.



**Abb. 37.:** Messprofil eines Brückenhauptträgers.

In **Abb. 37** sind Unstetigkeiten im Messprofil in Form von abrupten Niveauänderungen zu erkennen. Diese Unstetigkeiten zeigen im Wesentlichen zwei charakteristische Muster:

- Typ 1: abrupte Niveauänderungen **mit** Rückkehr auf das Ausgangsniveau (Spitzen),
- Typ 2: abrupte Niveauänderungen **ohne** Rückkehr auf das Ausgangsniveau (Sprünge).

Solche Unstetigkeiten im Messprofil können einerseits aufgrund von Fehlmessungen entstehen, andererseits auch durch nicht zum Tragwerk gehörende Objekte wie adaptierte Sensorik oder Bewuchs. In diesen Fällen treten hauptsächlich Unstetigkeiten des ersten Typs auf. In **Abb. 37** ist eine solche Unstetigkeit im Bereich um die Punktnummer 100 zu erkennen.

Darüber hinaus können Unstetigkeiten auch aufgrund der gemessenen Oberflächenstruktur auftreten. Durch die Verbindung der Stahlteile des Hauptträgers mit Nieten entstehen ebenfalls abrupte Niveauänderungen mit Rückkehr auf das Ausgangsniveau, z. B. im Bereich der Messpunkte 300 bis 800.

Da der abgebildete Hauptträger aus mehreren Stahlteilen besteht, treten aufgrund der Aussteifung mit zusätzlichen Stahlteilen zur Mitte hin abrupte Niveauänderungen ohne Rückkehr auf das Ausgangsniveau auf, sogenannte „Sprünge“, beispielsweise im Bereich um die Messpunkte 175, 280 und 880.

Aufgrund dieser beiden charakteristischen Muster gliedert sich die Analyse von Messprofilen in zwei Phasen:

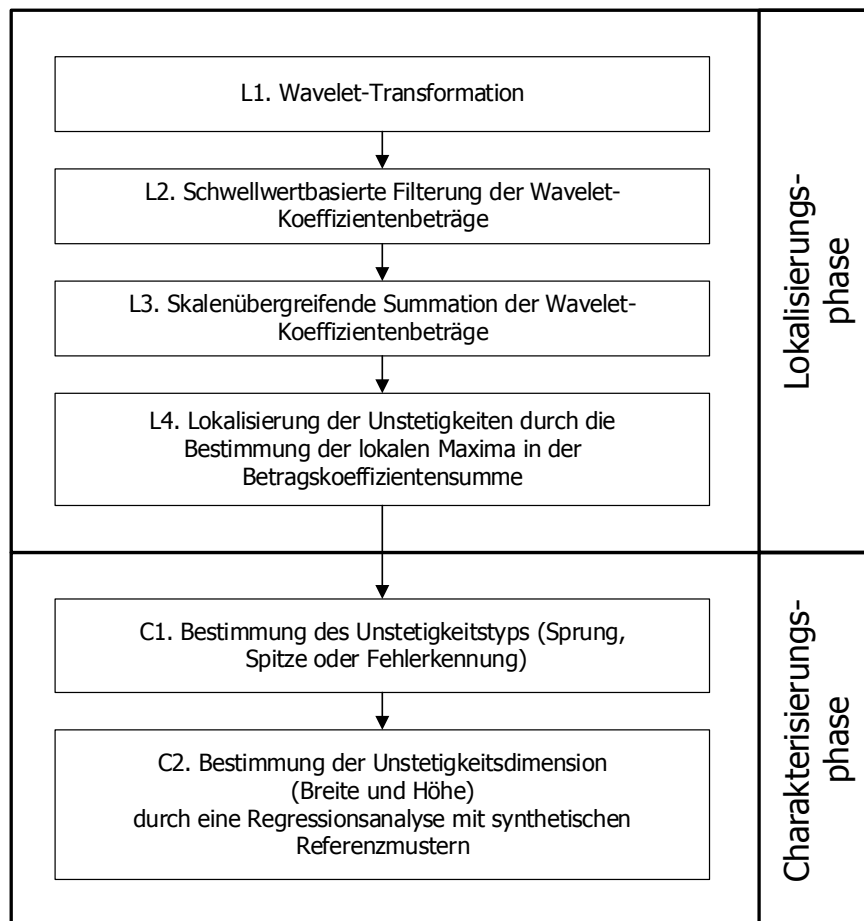
1. Identifizierung, d. h. Lokalisierung der Unstetigkeiten im Messprofil.
2. Analyse der lokalisierten Unstetigkeiten, d. h. Klassifizierung des Typs der Unstetigkeiten und Bestimmung ihrer Dimension.

Mit der Lokalisierung der Unstetigkeiten im Messprofil wird die räumliche Position bestimmt, welche die Grundlage für alle weiteren Analyseschritte bildet. Darauf aufbauend wird zunächst der Typ der Unstetigkeit ermittelt.

Anschließend kann die Dimension der Unstetigkeit in Form von Höhe und Breite bestimmt werden. Mit der Breite werden alle zur Unstetigkeit gehörenden Messpunkte des Profils erfasst und so die Trennung von betroffenen und nicht betroffenen Messpunkten durchgeführt. Über die Höhe der Niveauänderung der Unstetigkeiten können zusätzlich Fehlmessungen von den Details der Oberflächenstruktur separiert werden.

### 3.1.3 Realisierung eines Analysealgorithmus

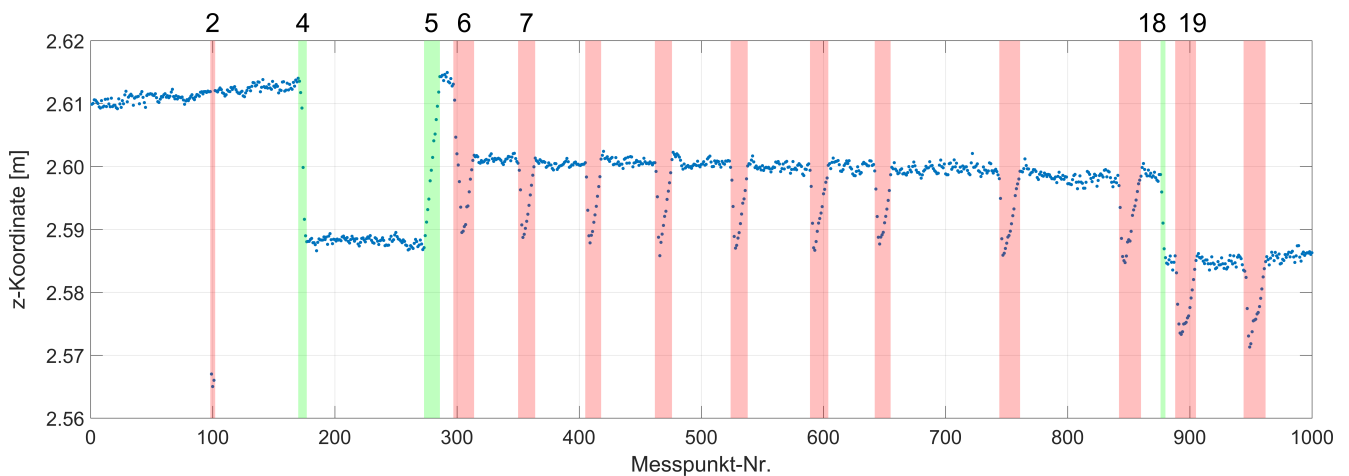
In **Abb. 38** ist der allgemeine Ablauf des Algorithmus zur automatischen Analyse von Messprofilen dargestellt, der sich in die zwei zuvor aufgezeigten Phasen der Lokalisierung und der Charakterisierung gliedert. In der Lokalisierungsphase werden dabei die Unstetigkeiten identifiziert und in der Charakterisierungsphase erfolgt die Analyse der Unstetigkeiten bezüglich des Typs und der Dimension.



**Abb. 38.:** Schematische Darstellung des Analysealgorithmus.

Bevor in den Abschnitten 3.1.3.1 und 3.1.3.2 eine detaillierte Erläuterung der einzelnen Schritte des Algorithmus erfolgt, sollen zunächst für das in **Abb. 37** gezeigte Messprofil die Ergebnisse der einzelnen Phasen präsentiert werden.

In **Abb. 39** ist das Ergebnis der Lokalisierungsphase und des ersten Schrittes der Charakterisierungsphase in Form von farblich unterschiedlich markierten Unstetigkeitsstellen im Messprofil dargestellt. Sprünge sind dabei in grün und Spitzen in rot eingefärbt.



**Abb. 39.:** Messprofil mit lokalisierten Unstetigkeiten. Die Nummerierung der Unstetigkeiten folgt aus der Lokalisierungsphase.

Als Ergebnis der Analyse des dargestellten Messprofils werden insgesamt 15 Unstetigkeiten lokalisiert, bei denen es sich um drei Sprünge und zwölf Spitzen handelt. Unter Verwendung der letzten beiden Schritte der Charakterisierungsphase ist in **Tab. 39** eine Auswahl der finalen Ergebnisse des Analysealgorithmus zusammengestellt. Die lokalisierten Unstetigkeiten werden darin neben der Lokalisierung (**Position**) über ihren **Typ**, die Richtung (**Vorzeichen**), die Größe der abrupten Niveauänderung (**Höhe**) sowie die Anzahl der beteiligten Messpunkte (**Breite**) charakterisiert.

lokalisierte Unstetigkeit	Position	Typ	Vorzeichen	geschätzte Höhe [mm]	Breite
2	100	Spitze	(−)	64	4
4	174	Sprung	(−)	25	4
5	280	Sprung	(+)	26	16
6	304	Spitze	(−)	20	12
7	356	Spitze	(−)	13	12
18	884	Sprung	(−)	17	8
19	896	Spitze	(−)	15	20

**Tab. 39.:** Auswahl von lokalisierten und analysierten Unstetigkeiten entsprechend **Abb. 39**.

Anhand dieser Charakterisierungsparameter (Typ, Vorzeichen, Höhe und Breite) lassen sich im weiteren Verlauf Entscheidungsregeln zur Trennung der relevanten Tragwerkspunkte von den aufgedeckten Unstetigkeitsbereichen formulieren, siehe Abschnitt 3.1.4.

---

### 3.1.3.1 Lokalisierungsphase

---

Die Lokalisierungsphase beinhaltet, wie in **Abb. 38** dargestellt, die ersten vier Schritte (L1 bis L4) des Analysealgorithmus. Ihre primäre Aufgabe ist die Identifikation von Positionen im Messprofil, an denen Unstetigkeiten in Form von abrupten Niveauänderungen auftreten.

Diese Mustererkennungsaufgabe kann sehr effizient mit der stationären Wavelet-Transformation (Schritt L1), einer speziellen Version der diskreten Wavelet-Transformation, gelöst werden.

Das Messprofil wird entsprechend den Ausführungen in Abschnitt 3.1.1 mit der Wavelet-Funktion verglichen, d. h. das Wavelet wird über das zu untersuchende Messprofil geschoben, wobei fortlaufend die Korrelation zwischen Messprofil und Wavelet-Funktion bestimmt wird, siehe **Abb. 35.a**. Dabei erzeugen Positionen mit guter Übereinstimmung zwischen Muster und Messprofil hohe Korrelationen. Die Werte dieser Korrelationen werden als Wavelet-Koeffizienten bezeichnet.

Insgesamt wird dieser Vorgang auch als Multiskalenanalyse bezeichnet, da er mit unterschiedlich skalierten Größen der Wavelet-Funktion durchgeführt wird. Dadurch sind die berechneten Wavelet-Koeffizienten sowohl von der Position im Signal als auch von der verwendeten Skala abhängig und stellen eine Maßzahl für den Energiegehalt an der entsprechenden Position und Frequenz dar.

Die diskrete Wavelet-Transformation ist jedoch translationsvariant, d. h. wird das Signal leicht im Ortsbereich verschoben führt dies zu veränderten Wavelet-Koeffizienten und nicht nur zu leicht verschobenen, aber ansonsten identischen Wavelet-Koeffizienten. Diese Problematik wird durch die stationäre Wavelet-Transformation behoben, siehe u. a. [Bän05] und [She92].

Das Ergebnis der Multiskalenanalyse ist in diesem Fall eine translationsinvariante Orts-Frequenz-Darstellung, bei der jede Skala einen bestimmten Frequenzbereich repräsentiert. Eine solche Darstellung präsentiert einen skaliert aufgelösten Ortsbereich und ermöglicht somit die räumliche Identifizierung von Unstetigkeiten in Abhängigkeit ihres Auftretens in verschiedenen Frequenzbereichen.

Durch die Abbildung des Signals auf verschiedenen Skalen bzw. Frequenzbereichen wird zunächst die Lösung eines diffizilen Problems jeder Messreihenanalyse ermöglicht: die Trennung des deterministischen Messsignals vom überlagerten stochastischen Messrauschen.

Da sich im hochfrequenten Teil der Skalen hauptsächlich das Messrauschen abbildet, kann mit einer (skalenabhängigen) Filterung auf Basis der Wavelet-Koeffizienten das zu untersuchende Messprofil größtenteils vom Rauschen befreit werden. Dieser auch als Denoising bezeichnete Vorgang wird in Schritt L2 beschrieben.

Da sich Unstetigkeiten nicht isoliert in einzelnen Frequenzbereichen abbilden, sondern im gesamten Frequenzbereich auftreten, kann die Lokalisierung durch die skalenübergreifende Verkettung (Schritt L3) der Wavelet-Koeffizienten ermöglicht werden.

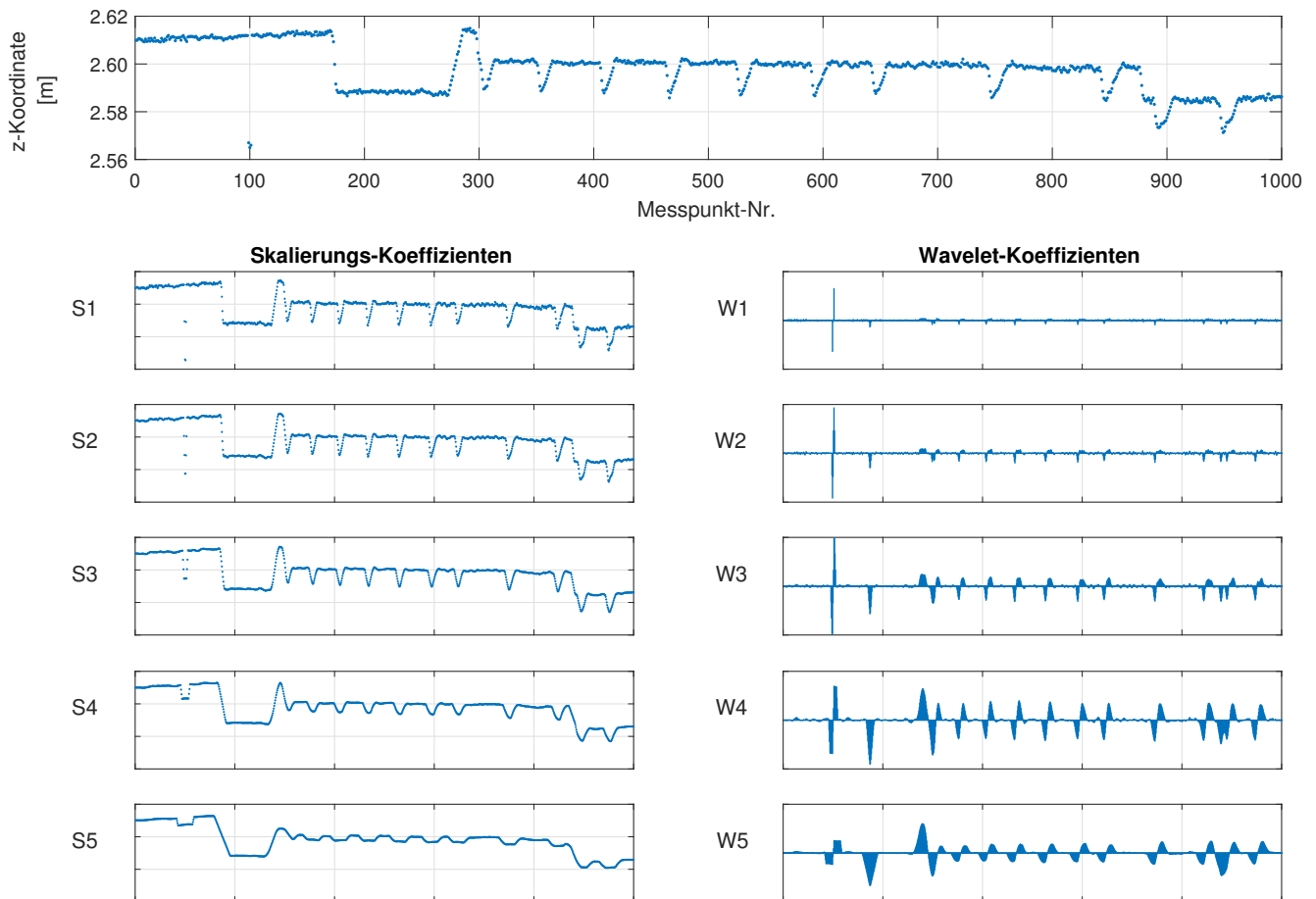
Durch die Verwendung der stationären Wavelet-Transformation ist die Abbildung der zu lokalisieren Unstetigkeiten in den verschiedenen Skalen positionstreu, sodass sich die Verkettung der Wavelet-Koeffizienten relativ einfach durch eine spaltenweise Summierung über alle Skalen realisieren lässt.

Wird diese Wavelet-Koeffizientensumme als diskrete Funktion interpretiert, so treten die zu lokalisieren Unstetigkeiten als lokale Maxima dieser Funktion hervor (Schritt L4). Durch die Bestimmung der lokalen Maxima lässt sich schlussendlich die Lokalisierung der Unstetigkeiten im Messprofil durchführen.

Im Folgenden werden die einzelnen Schritte der Lokalisierungsphase anhand des in **Abb. 37** dargestellten Messprofils detailliert erläutert.

## Schritt L1: Multiskalenanalyse (Wavelet-Transformation) des Messprofils

Die Motivation für den Einsatz der stationären Wavelet-Transformation ist die Realisierung eines skaliert aufgelösten Messprofils. Die in **Abb. 41** dargestellte Multiskalenanalyse des Messprofils entspricht dieser Anforderung in Form einer Orts-Frequenz-Darstellung. Die räumliche Identifizierung der gesuchten Unstetigkeiten wird ermöglicht, da neben der räumlichen Auflösung auch differenziert der gesamte Frequenzbereich abdeckt wird.



**Abb. 41.:** Multiskalenanalyse des Messprofils (oberste Zeile). Auf der linken Seite sind die Skalierungs-Koeffizienten (in S1 bis S5) dargestellt, auf der rechten Seite die Wavelet-Koeffizienten (in W1 bis W5).

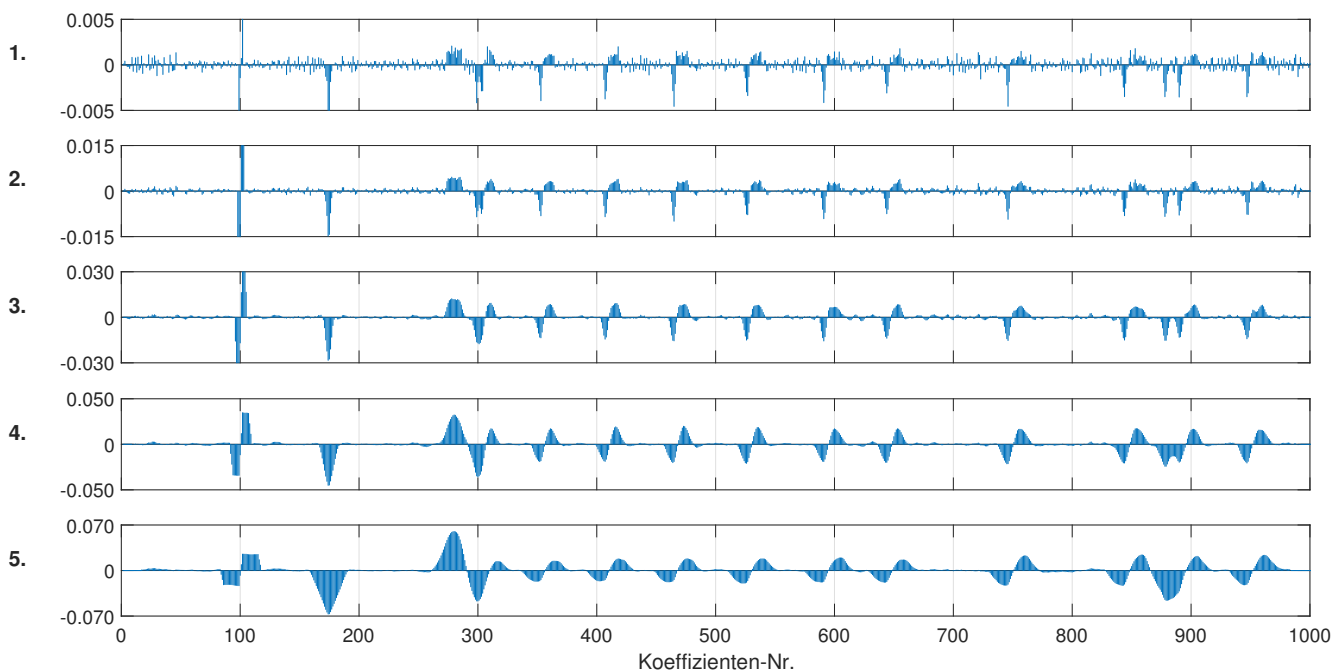
In der obersten Zeile der **Abb. 41** ist zunächst das ursprüngliche Messprofil dargestellt. Darunter sind auf der linken Seite jeweils die verschiedenen Skalierungen des Messprofils (Skalierungs-Koeffizienten in S1 bis S5) zu sehen. Es wird deutlich, dass durch die Wavelet-Transformation in jeder Skalierungsstufe Details eines bestimmten Frequenzbereichs aus dem Messprofil entfernt werden, wobei diese Details den Differenzen zwischen den Skalierungsstufen entsprechen. Diese Differenzen (in W1 bis W5) sind für jede Skala auf der rechten Seite der **Abb. 41** dargestellt und werden als Wavelet-Koeffizienten bezeichnet. Die Summe der Skalierungs- und Wavelet-Koeffizienten einer Skala ergibt somit die Skalierungs-Koeffizienten der darüber liegenden Skala, d. h. S4 ergibt sich aus der Addition von S5 und W5. Dementsprechend lässt sich durch eine kaskadierende Summierung der Wavelet- mit den Skalierungs-Koeffizienten aus der Multiskalenanalyse das ursprüngliche Signal exakt rekonstruieren.

Zur Anwendung der Wavelet-Transformation müssen zunächst zwei grundlegende Entscheidungen getroffen werden:

1. Welche Analysefunktion (Wavelet) soll verwendet werden?  
Entsprechend der Zielstellung der Lokalisierungsphase kommt in diesem Fall das Haar-Wavelet als Analysefunktion zum Einsatz. Es bietet eine optimale Approximation der 1. Ableitung (siehe [Neu08]) und eignet sich somit insbesondere für die Erkennung von isolierten hochfrequenten Unstetigkeiten im Messprofil.
2. Auf wie vielen Skalen soll analysiert werden (Zerlegungstiefe)?  
Mit der Zerlegungstiefe wird neben der Anzahl von skalierten Versionen des Messprofils insbesondere die Unterteilung des Frequenzbereiches bestimmt. Damit ist letztendlich auch die Auflösung der Lokalisierung definiert, d. h. in welchem minimalen räumlichen Abstand können Unstetigkeiten im Messprofil lokalisiert werden.

Da bei der Lokalisierung von Unstetigkeiten im Messprofil die Erkennung von abrupten Änderungen (Differenzen zwischen Messpunkten) im Vordergrund steht, konzentrieren sich die weiteren Betrachtungen auf die Wavelet-Koeffizienten der Multiskalenanalyse.

In **Abb. 42** sind die Wavelet-Koeffizienten W1 - W5 aus **Abb. 41** im Detail dargestellt. Als Analysefunktion wird entsprechend den obigen Ausführungen das Haar-Wavelet mit einer für diese Anwendung ausreichenden Zerlegungstiefe von 5 Skalen verwendet.



**Abb. 42.:** Detaillierte Darstellung der Wavelet-Koeffizienten der Multiskalenanalyse aus **Abb. 41**.

In dieser Darstellung nimmt die Zerlegungstiefe von oben nach unten zu. Die einzelnen Skalen spiegeln somit den Energiegehalt des Signals in den verschiedenen Frequenzbereichen wieder. Die Koeffizienten der 1. Skala repräsentieren die Energie des Messprofils im hohen Frequenzbereich. Die Koeffizienten in der 5. Skala enthalten dagegen die Energieanteile der niedrigen Frequenzen.

Trotz der unterschiedlichen Skalierung der einzelnen Zerlegungsstufen wird deutlich, dass sich die größten Wavelet-Koeffizienten skalenübergreifend an gewissen Positionen gruppieren.



---

Anhand dieser gruppierten Wavelet-Koeffizienten lassen sich bereits visuell erste Informationen über die einzelnen Unstetigkeiten ableiten, insbesondere hinsichtlich ihrer Breite, vergleiche auch **Tab. 39** und **Abb. 39**. Der Vergleich der Sprünge 4 (Koeffizienten-Nr. 174) und 5 (Koeffizienten-Nr. 280) zeigt neben den unterschiedlichen Vorzeichen auch eine unterschiedliche Charakteristik der Wavelet-Koeffizienten, was insbesondere in den niedrigen Skalen zu erkennen ist.

In den Skalen 1 - 3 weist der Sprung 4 deutlich größere Amplituden auf, die sich jedoch auf einen schmalen Bereich konzentrieren, wohingegen der Sprung 5 niedrigere Amplituden besitzt, die sich auf einen breiteren Bereich aufteilen. Diese Eigenschaften entstehen aufgrund der geringeren Breite des Sprungs 4 bei gleicher Höhe, im Vergleich zu Sprung 5.

Da der Sprung 4 aus weniger Punkten besteht und dementsprechend einen steileren Anstieg besitzt, wird bereits mit der geringsten Waveletaushendung in der ersten Zerlegungsstufe ein großer Anteil der Sprungamplitude erfasst. Im Gegensatz dazu wird bei Sprung 5 aufgrund der größeren Breite erst in höheren Zerlegungstiefen ein entsprechender Anteil der Sprungamplitude abgedeckt. Somit verteilt sich die Energie des Sprungs auf einen breiteren Bereich.

Ähnliche Erkenntnisse lassen sich auch aus dem Vergleich der Spitzen 2 (Koeffizienten-Nr. 100) und 7 (Koeffizienten-Nr. 356) ziehen, wobei hier zusätzlich die Höhe stark variiert. An Spitze 7, die aufgrund einer Niete entsteht, zeigt sich exemplarisch, dass in den niedrigeren Skalen der negative Wavelet-Koeffizientenanteil schmal ist als der Positive. Dafür weisen die negativen Wavelet-Koeffizientenanteile eine betragsmäßig größere Amplitude auf. Dieser Effekt entsteht durch die Aufnahmeorientierung des Profilsensors, wodurch Spitzen, die durch Niete induziert sind, eine asymmetrische Punkteverteilung besitzen, vergleiche auch **Abb. 39**.

Darüber hinaus lassen sich aufgrund des Messrauschens weitere Koeffizienten detektieren, die keiner Gruppierung zugeordnet werden können und in **Abb. 42** insbesondere in der 1. Skala zu sehen sind. Bevor auf die skalenübergreifende Betrachtung der Wavelet-Koeffizienten eingegangen wird, sollen im nächsten Analyseschritt Möglichkeiten zur Reduzierung dieser nicht relevanten Koeffizienten diskutiert werden.

## Schritt L2: Filterung der Wavelet-Koeffizienten

Im zweiten Schritt soll mit einer Filterung der Wavelet-Koeffizienten versucht werden, die Rauschanteile in den Koeffizienten zu eliminieren, um so die Lokalisierung der Unstetigkeiten zu erleichtern und Fehlidentifizierungen zu vermeiden.

Die Filterung ist trotz des hohen Signal-Rausch-Verhältnisses (SNR, engl.: signal to noise ratio) der Wavelet-Koeffizienten eines Messprofils, aufgrund der sich deutlich abhebenden charakteristischen Form von Messfehlern und Unstetigkeiten, notwendig. Ohne diesen Schritt würden bei der Lokalisierung, die auf der Summation der Wavelet-Koeffizientenbeträge basiert, auch die Beträge aufgrund von Rauschanteilen zur Erkennung von Unstetigkeiten führen. Die Quote der Fehlidentifizierungen könnte die Anzahl der korrekt erkannten Unstetigkeiten dadurch sogar übersteigen.

Da die Vorzeichen im Rahmen der Lokalisierungsphase nicht relevant sind, werden im Folgenden lediglich die Wavelet-Koeffizientenbeträge verwendet, siehe **Abb. 45**.

In [Neu08, S. 75 f.] wird gezeigt, dass sich das Rauschen einer Messreihe über Varianzfortpflanzung auf die Wavelet-Koeffizienten überträgt, wobei das Varianzniveau erhalten bleibt. Die Wavelet-Koeffizienten enthalten somit neben den Signalanteilen, siehe auch **Abb. 42**, welche durch die zu lokalisierenden Unstetigkeiten induziert werden, auch Rauschanteile entsprechend dem Niveau des ursprünglichen Signals.

Diese Rauschanteile werden entsprechend den Ausführungen von [Neu08] als zufälliger, hochfrequenter Anteil des beobachteten Signals betrachtet, wobei die Energie des Rauschanteils deutlich niedriger ist, als die des informationshaltigen Signalanteils.

---

Die Filterung der Wavelet-Koeffizienten wird als schwellwertbasierte Filterung (Wavelet-Denoising) umgesetzt, bei der alle Koeffizienten, die unterhalb eines zu definierenden Schwellwertes liegen eliminiert werden.

Bei der Wahl des Schwellwertes müssen insbesondere die stochastischen Eigenschaften des Rauschanteils berücksichtigt werden, siehe [Neu08, S. 94]. Als Näherung für das Sensorrauschen kann weißes gaußsches Rauschen angenommen werden. Von [DJ94] wird der folgende funktionale Zusammenhang für die Festlegung des Schwellwertes  $\delta$  vorgeschlagen:

$$\delta = \sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \log N}. \quad (44.a)$$

Diese auch als universeller Schwellwert bezeichnete Größe wird durch die Standardabweichung  $\sigma$  und die Anzahl  $N$  der Punkte im Messprofil bestimmt.

Wie die Ausführungen in Kapitel 2 zeigen, hängt die Standardabweichung einzelner Punkte im Messprofil von mehreren, zum Teil nicht quantifizierbaren Faktoren ab und kann daher in der Praxis nicht punktweise bestimmt werden.

Die Standardabweichung  $\sigma$  muss daher aus der Streuung des Messprofils abgeleitet werden. Da aufgrund der Form des Messprofils eine Bestimmung im Ortsbereich nicht in Betracht kommt, müssen die Rauschanteile der Wavelet-Koeffizienten  $\nu_{i,n}$  für die Berechnung der Standardabweichung  $\sigma$  genutzt werden. Dabei gibt  $i$  die Zerlegungsstufe und  $n$  die Nummerierung der Koeffizienten an.

Der sogenannte Median der absoluten Abweichungen (MAD, engl.: median of absolute deviations) liefert eine konsistente, robuste Schätzung für die Standardabweichung  $\sigma$  nach dem Modell einer Normalverteilung:

$$\sigma = \frac{\text{median}(|\nu_{1,n} - \text{median}(\nu_1)|)}{0.6745}. \quad (44.b)$$

Für die Berechnung werden lediglich die Wavelet-Koeffizienten der ersten Skala  $\nu_1$  verwendet, da diese gemäß [DJ94] in der Praxis größtenteils durch Rauschen verursacht werden. Die Verwendung des MAD garantiert darüber hinaus, dass der Einfluss großer Wavelet-Koeffizienten aufgrund doch vorhandener Signalanteile auf die Schätzung der Standardabweichung  $\sigma$  gedämpft wird. Der Wert 0,6745 resultiert aus der Verwendung des 0,75 - Quantils der Standardnormalverteilung.

In [Neu08] wird gezeigt, dass unter der Annahme von weißem gaußschem Rauschen und aufgrund der Orthonormalität der verwendeten Wavelet-Transformation, der Einsatz eines einheitlichen, d. h. skalenunabhängigen Schwellwertes  $\delta$  zulässig ist.

Nach der skalenunabhängigen, schwellwertbasierten Filterung sind in den Wavelet-Koeffizienten nur noch die Beträge enthalten, die größer als der Schwellwert sind. Für diese Wavelet-Koeffizienten können unterschiedliche Verarbeitungsansätze spezifiziert werden: u. a. Hard-Thresholding und Soft-Thresholding.

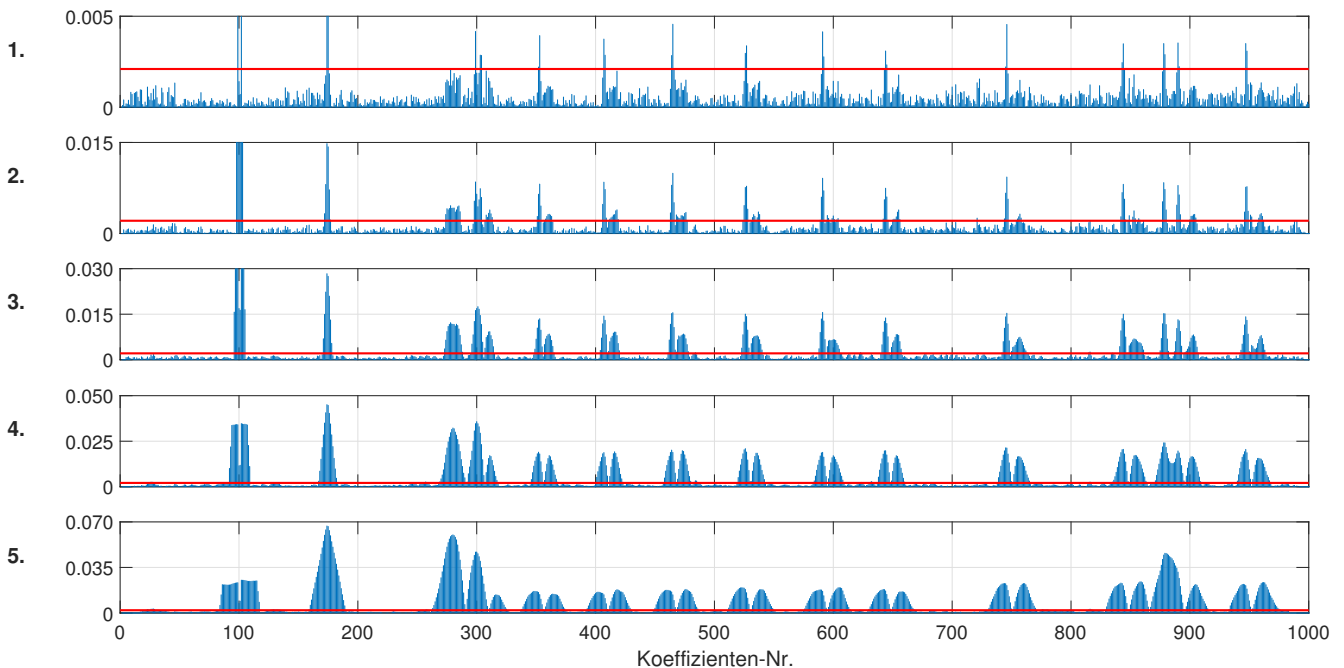
Die beiden Ansätze unterscheiden sich in der nichtlinearen Transformation, die auf die verbleibenden Wavelet-Koeffizienten der einzelnen Skalen angewendet wird.

Werden die nicht herausgefilterten Koeffizienten unverändert beibehalten, wird von Hard-Thresholding gesprochen. Beim Soft-Thresholding werden dagegen alle Koeffizienten um den Schwellwert an sich reduziert, siehe z. B. [PW00].

Die Motivation zur Verwendung von Soft-Thresholding liegt laut [Bän05] in der Reduktion der Beiträge von Koeffizienten, die vom Rauschen dominiert werden und nur aufgrund relativ kleiner Beiträge des Signals über den Schwellwert gehoben werden. Dies bietet den Vorteil, dass „glatte“ Profilanteile besser approximiert werden, und ist insbesondere bei einem niedrigen SNR sinnvoll.

Da es sich bei der Zielstellung um die Erkennung von Unstetigkeiten handelt und das SNR der Messprofile hoch ist, kommt für die Anwendung im Rahmen des Analysealgorithmus Hard-Thresholding zum Einsatz. Somit bleibt mehr Energie an Kanten und anderen Unstetigkeiten erhalten, was die anschließende Lokalisierung erleichtert.

In **Abb. 45** sind zur Veranschaulichung der obigen Ausführungen die Beträge der Wavelet-Koeffizienten der fünf Zerlegungsstufen des Messprofils zusammen mit dem berechneten Schwellwert dargestellt. Dieser Schwellwert wird auf Basis der Wavelet-Koeffizientenbeträge der ersten Zerlegungsstufe als universeller Schwellwert  $\delta$  berechnet und skalenunabhängig eingesetzt.



**Abb. 45.:** Die Beträge der Wavelet-Koeffizienten der fünf Zerlegungsstufen sind in blau dargestellt. Der universelle Schwellwert, basierend auf den Wavelet-Koeffizienten der ersten Zerlegungsstufe, ist jeweils in rot eingezeichnet.

In der ersten Zerlegungsstufe zeigt sich die Konzentration der Energie in wenigen Wavelet-Koeffizienten, die über dem bestimmten Schwellwert liegen. Dabei handelt es sich hauptsächlich um die zu identifizierenden Unstetigkeiten. Aufgrund seiner Breite bildet der Sprung 5 (Koeffizienten-Nr. 280) eine Ausnahme, er liegt knapp unterhalb des Schwellwertes, da die Energie sich auf einen breiteren Bereich mit niedrigeren Amplituden aufteilt.

Darüber hinaus weisen die durch Nieten induzierten Spitzen die Besonderheit auf, dass lediglich die negativen Wavelet-Koeffizientenanteile entsprechend **Abb. 42** über dem Schwellwert liegen. Dies liegt, wie bereits angedeutet, an der unterschiedlichen Punktzahl der auf- und absteigenden Flanke.

Des Weiteren sind auch die gleichmäßig verteilten Wavelet-Koeffizienten aufgrund von Rauschanteilen gut zu erkennen. Die Beträge der informationshaltigen Wavelet-Koeffizienten heben sich jedoch deutlich von diesen ab, sind aber zahlenmäßig unterlegen.

Die Filterung mit einem skalenunabhängigen Schwellwert liefert gute Ergebnisse, sodass die Beschreibung der stochastischen Eigenschaften des Profilsclannerrauschanteils unter der Annahme von gaußschem weißen Rauschen eine gute Näherung darstellt. Durch die so durchgeführte Reduktion der Rauschanteile kann im nächsten Schritt die skalenübergreifende Analyse sinnvoll durchgeführt werden.

---

### Schritt L3: Skalenübergreifende Summation der Wavelet-Koeffizienten

Bei der Betrachtung der Ergebnisse der Multiskalenanalysen in **Abb. 42** bzw. **Abb. 45** sind Gruppen von Wavelet-Koeffizienten zu erkennen, die sich um gewisse räumliche Positionen konzentrieren. Aufgrund der großen Beträge dieser Koeffizienten ist davon auszugehen, dass es sich dabei um informationshaltige Signalanteile des Messprofils handelt. Diese Gruppierung findet skalenübergreifend statt, d. h. die Wavelet-Koeffizienten gruppieren sich in allen Skalen um die gleichen Positionen.

Der Vergleich mit **Abb. 37** zeigt, dass diese Positionen mit den zu lokalisierenden Unstetigkeiten im Messprofil übereinstimmen. Dieses Ergebnis resultiert einerseits aus der skalenübergreifenden Charakteristik der Unstetigkeiten und andererseits aus der Translationsinvarianz der stationären Wavelet-Transformation, die zur Berechnung dieser Multiskalenanalysen verwendet wird. Aufgrund dieser beiden Aspekte werden Unstetigkeiten nicht isoliert in einzelnen Frequenzbereichen abgebildet, sondern treten in allen Skalen an denselben Positionen auf.

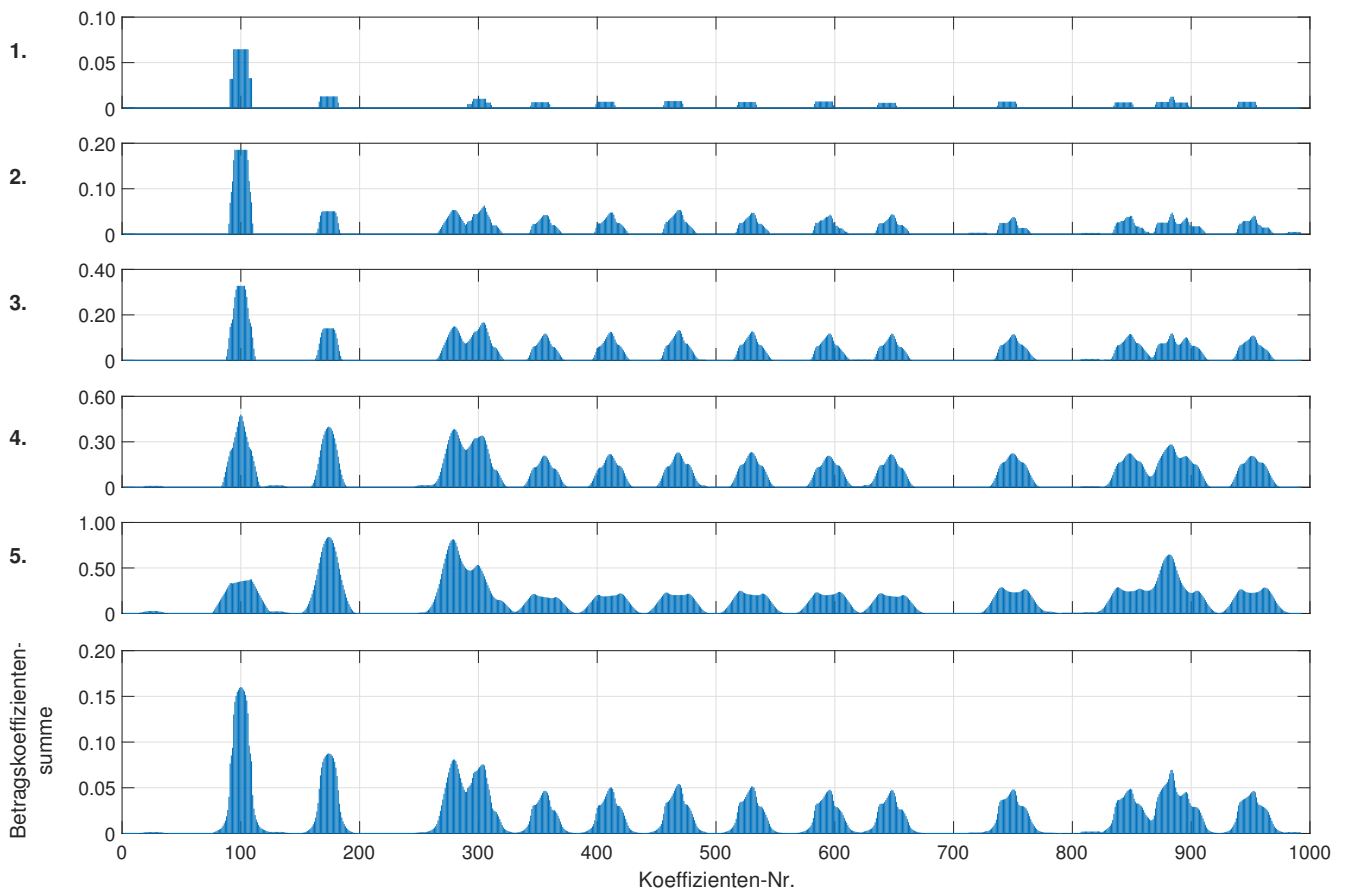
Aus diesen zunächst visuellen Erkenntnissen sollen im Folgenden quantitative Größen abgeleitet werden, die sich in einem Algorithmus zur Identifizierung der Unstetigkeiten verwenden lassen. Da die gesuchten Unstetigkeiten auf allen Skalen auftreten, ist die skalenübergreifende Betrachtung der Wavelet-Koeffizienten für eine möglichst sichere Identifizierung sinnvoll. Eine solche skalenübergreifende Verketzung lässt sich über eine spaltenweise Summierung der Koeffizienten realisieren.

Da für die Lokalisierung lediglich die absolute Größe der Koeffizienten von Interesse ist, wird diese Summation weiterhin mit den Beträgen der Wavelet-Koeffizienten durchgeführt.

Zur Verbesserung der Lokalisierungseigenschaften wird in [Bän05] vorgeschlagen, vor der skalenübergreifenden Aufsummierung eine gleitende Summenbildung innerhalb der einzelnen Skalen durchzuführen, wobei die Größe des gleitenden Fensters als Funktion der Zerlegungstiefe bestimmt wird. Durch diese skaleninterne, gleitende Summenbildung werden die dominierenden, informationshaltigen Signalanteile zusätzlich verstärkt, siehe **Abb. 47** Zeilen 1 bis 5. Der Vergleich mit **Abb. 45** zeigt neben der Abwesenheit von Rauschanteilen aufgrund der Filterung auch die deutliche Steigerung der relevanten Signalanteile sowie den glättenden Effekt der gleitenden Summenbildung.

Das Ergebnis der skalenübergreifenden Summierung ist schlussendlich die sogenannte Betragskoeffizientensumme, die als diskrete Funktion über alle Positionen von Koeffizienten angesehen werden kann, vergleiche **Abb. 47** letzte Zeile.

Im Gegensatz dazu würde eine direkte spaltenweise Summierung zu einer detailreicheren Betragskoeffizientensumme führen, als unter Verwendung des in [Bän05] vorgeschlagenen Ansatzes, dafür aber mit einer größeren Anzahl an potenziellen Fehlidentifikationen.



**Abb. 47.:** Zeilen 1 - 5: Entrauschte und über eine gleitende Summenbildung vorverarbeitete Betragskoeffizienten der Skalen 1 - 5; Zeile 6: Betragskoeffizientensumme.

Entsprechend den Ausführungen in Schritt L1 beeinflusst neben der Wahl der Summierungs- und Zerlegungstiefe die gewählte Zerlegungstiefe die Form der Betragskoeffizientensumme und entscheidet damit, ob nahe beieinanderliegende Unstetigkeiten noch voneinander trennbar sind. Durch die zunehmende Fenstergröße (Waveletausdehnung) in größeren Zerlegungstiefen wird die räumliche Trennung der Unstetigkeiten schlechter. Eine kleinere Zerlegungstiefe führt zu mehr Details in der Betragskoeffizientensumme; eine große Zerlegungstiefe hat hingegen einen glättenden Einfluss.

Insgesamt betrachtet muss daher entschieden werden, welche Priorität bei der Lokalisierung im Vordergrund steht: Die Identifizierung möglichst aller, auch nahe beieinanderliegender Unstetigkeiten mit dem Nachteil vieler potenzieller Fehlidentifikationen oder eine zuverlässige Identifizierung der dominanten Unstetigkeiten mit dem Nachteil einer schlechter aufgelösten Lokalisierung.

Neben diesen, für die grundsätzliche Lokalisierung von Unstetigkeiten wichtigen Aspekten, lässt sich die Lokalisierungsphase auch speziell auf die Erkennung bestimmter Unstetigkeitstypen ausrichten. Dazu wird die unterschiedliche Charakteristik der Abbildung über die Skalen (Betragskoeffizientenverläufe) verschiedener Unstetigkeitstypen verwendet. Durch eine gezielte Gewichtung der einzelnen Skalen können z. B. Spitzen in der Betragskoeffizientensumme hervorgehoben und so die Lokalisierung typspezifisch verbessert werden, siehe auch **Abb. 47**.

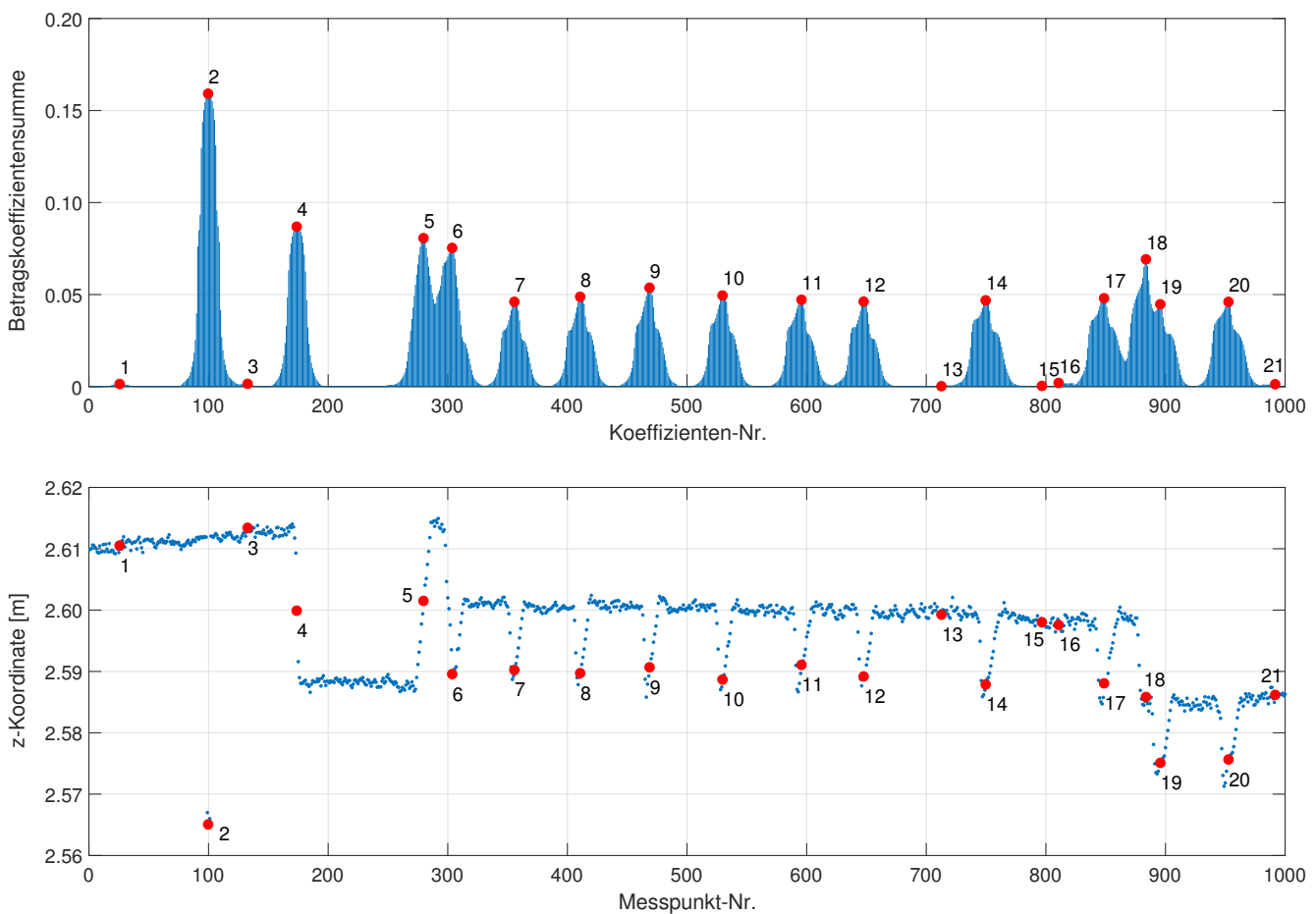
Mit der Konzentration der relevanten Wavelet-Koeffizienten in der Betragskoeffizientensumme ist im Rahmen der Lokalisierungsphase der vorletzte Schritt abgeschlossen und die Grundlage zur folgenden finalen Identifizierung der Unstetigkeiten gelegt.

#### Schritt L4: Bestimmung der Maxima in der Beträgskoeffizientensumme

Aus den bisherigen Ausführungen geht hervor, dass in den lokalen Maxima der Beträgskoeffizientensumme die Information über die Lage der zu lokalisierenden Unstetigkeiten enthalten ist. Dies bedeutet, dass diese zur Lokalisierung von Unstetigkeiten im Messprofil bestimmt werden müssen.

Die im oberen Diagramm in **Abb. 48** markierten lokalen Maxima der Beträgskoeffizientensumme wurden mit einem Algorithmus berechnet, der sich an [Bän05] orientiert. Für eine detailliertere Beschreibung soll an dieser Stelle auf den Anhang A.3 verwiesen werden.

Insgesamt werden 21 Maxima gefunden und entsprechend fortlaufend nummeriert. Im unteren Teil der Abbildung ist zu erkennen, dass die gefundenen Maxima sowohl die 15 tatsächlich auftretenden Unstetigkeiten als auch 6 fälschlicherweise als Unstetigkeit identifizierte Fälle beinhalten (markiert mit den Nummern: 1, 3, 13, 15, 16, 21). Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass mit der Eliminierung von fehlerhaft identifizierten Unstetigkeiten eine weitere Anforderung an den Analysealgorithmus gestellt wird.



**Abb. 48.:** oben: Beträgskoeffizientensumme mit markierten lokalen Maxima; unten: Messprofil mit lokalisierten Unstetigkeiten.

Generell liegt die Priorität auf der zuverlässigen Identifizierung aller tatsächlich im Messprofil enthaltenen Unstetigkeiten. Fehlerhaft identifizierte Unstetigkeiten aufgrund von nicht eliminierten Rauschanteilen werden, wie in **Abb. 48** zu sehen ist, zunächst akzeptiert. In der folgenden Charakterisierungsphase werden diese Fehlerkennungen im Rahmen des robusten Auswertansatzes eliminiert und haben somit keine Auswirkung auf die finalen Ergebnisse der automatischen Messprofilanalyse.

---

### 3.1.3.2 Charakterisierungsphase

---

Aufbauend auf der Lokalisierungsphase werden die 21 identifizierten Unstetigkeiten im Folgenden näher analysiert. In **Abb. 48** zeigt sich einerseits, dass sich diese Unstetigkeiten in zwei Muster klassifizieren lassen, andererseits aber auch noch Fehlerkennungen vorhanden sind. Abgesehen von den Fehlerkennungen handelt es sich bei den beiden auftretenden Mustern entsprechend den Anforderungen des Analysealgorithmus um abrupte Niveauänderungen mit und ohne Rückkehr auf das Ausgangsniveau.

Basierend auf den Ergebnissen der Lokalisierungsphase, folgen die Schritte C1 und C2 der Charakterisierungsphase, vergleiche **Abb. 38**. In diesen Schritten werden die gefilterten Wavelet-Koeffizienten in einer Umgebung um die lokalisierten Änderungsstellen gezielt skalenübergreifend analysiert.

Der erste Schritt (C1) beinhaltet die Bestimmung des Typs der Unstetigkeit und damit auch die Eliminierung von Fehlerkennungen. Dabei spielen die Betragsmaxima der einzelnen Zerlegungsstufen innerhalb der Analyseumgebung eine zentrale Rolle. Aufgrund deren Eigenschaften kann einerseits die Unterscheidung in Sprünge und Spitzen stattfinden und andererseits können Fehlerkennungen erkannt werden. In diesem Zusammenhang wird auch der Begriff der Betragskoeffizientenverläufe eingeführt.

Im zweiten Schritt (C2) wird die Dimension der Unstetigkeiten durch die Anpassung von synthetischen Referenzmustern an die Wavelet-Koeffizienten bzw. die Betragskoeffizientenverläufe im Rahmen einer Regressionsanalyse bestimmt.

#### Schritt C1: Bestimmung des Typs und der Richtung der lokalisierten Unstetigkeiten

Basierend auf der Lokalisierungsphase wird in diesem Schritt zunächst die Klassifizierung der lokalisierten Unstetigkeiten in Sprünge und Spitzen durchgeführt. Vor der finalen Klassifizierung müssen zunächst Fehlerkennungen identifiziert und eliminiert werden.

Die Identifizierung nicht signifikanter Unstetigkeiten in der Liste der lokalisierten Unstetigkeiten (vergleiche **Abb. 48**) findet ebenso wie die Klassifizierung der eigentlichen Unstetigkeiten innerhalb eines definierten Bereiches um die jeweilige Unstetigkeit statt, der sogenannten Analyseumgebung. Damit der Einfluss aller Zerlegungsstufen in die Charakterisierung miteinbezogen wird, ist die Dimension dieser Analyseumgebung eine Funktion der Zerlegungstiefe.

Die lokalisierten Unstetigkeiten werden zur Bestimmung ihres Typs bezogen auf ihren charakteristischen Verlauf innerhalb der Analyseumgebung gezielt analysiert. Dazu werden jeweils ihre skalenabhängigen Änderungen untersucht, d. h. die Bestimmung erfolgt auf Basis der innerhalb der Analyseumgebung liegenden Wavelet-Koeffizienten aus der Multiskalenanalyse.

Für die Bestimmung der Richtung (Vorzeichen) der Unstetigkeiten werden die Vorzeichen der Wavelet-Koeffizienten benötigt. Daher werden in der Charakterisierungsphase wieder die eigentlichen gefilterten Wavelet-Koeffizienten verwendet und nicht mehr ihre Beträge.

In **Abb. 51.a** sind anhand von repräsentativen Beispielen (lokalisierte Unstetigkeitsstellen 5, 7, 18 und 1, vergleiche **Abb. 48**) die wichtigsten Aspekte dieser Untersuchung veranschaulicht. Zur Darstellung sämtlicher Details wird auf eine einheitliche Skalierung aller Unstetigkeiten verzichtet.

Ergänzend dazu finden sich im Anhang A.2 allgemeine Beispiele zur Berechnung der Wavelet-Koeffizienten mit dem Haar-Wavelet.

Die erste Zeile von **Abb. 51.a** zeigt die Analyseumgebung um die lokalisierten Unstetigkeiten im Messprofil. Alle weiteren Zeilen zeigen jeweils die relevanten Ausschnitte der Multiskalenanalyse, wobei die dargestellten Wavelet-Koeffizienten als Approximationen der 1. Ableitungen der in Zeile 1 gezeigten Ausschnitte interpretiert werden können.



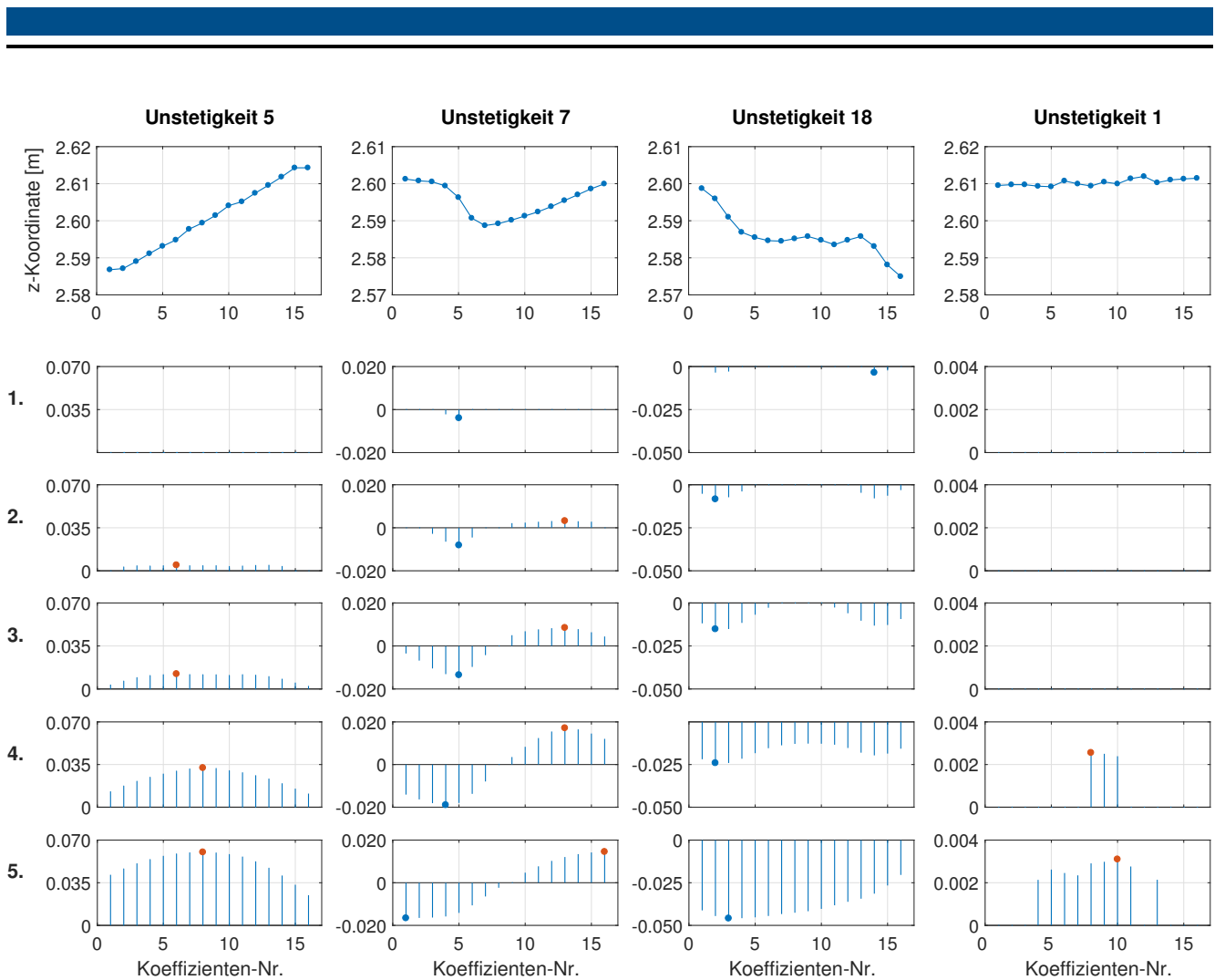
Zusätzlich sind die Maxima bzw. Minima der einzelnen Skalen je nach Vorzeichen durch einen farbigen Punkt markiert, die Beträge dieser Koeffizienten reichen prinzipiell zur automatischen Charakterisierung der Unstetigkeiten aus. Zunächst soll jedoch der konkrete Ablauf der Klassifizierung mit einer spaltenweisen Betrachtung von **Abb. 51.a** veranschaulicht werden:

- Die **erste Spalte** zeigt den charakteristischen Verlauf der Wavelet-Koeffizienten eines Sprunges (erkannte Unstetigkeit 5) innerhalb der Analyseumgebung. Die Wavelet-Koeffizienten besitzen alle dasselbe Vorzeichen. Daran lässt sich neben der Klassifizierung als Sprung auch direkt die Sprungrichtung, in diesem Fall ein positiver Sprung, erkennen.
- In der **zweiten Spalte** ist der charakteristische Verlauf einer Spitze (erkannte Unstetigkeit 7) dargestellt. Es treten Wavelet-Koeffizienten sowohl mit positivem als auch negativem Vorzeichen auf, und zwar entsprechend sortiert. Daran lässt sich neben der Klassifizierung als Spitze auch deren Richtung bestimmen. Da die Wavelet-Koeffizienten innerhalb der Analyseumgebung zunächst mit negativem Vorzeichen beginnen, handelt es sich bei der Unstetigkeit um eine negative Spitze.
- In der **dritten Spalte** sind die Wavelet-Koeffizienten in der Analyseumgebung um die Unstetigkeit 18 dargestellt. Hier treten entsprechend Spalte 1 lediglich Koeffizienten mit demselben Vorzeichen auf (in diesem Fall negativ), die Charakteristik ist jedoch nicht so eindeutig wie bei Unstetigkeit 5. Diese erkannte Unstetigkeit wurde bewusst ausgewählt, da an ihr der in den Schritten L1 und L3 thematisierte Zusammenhang zwischen Zerlegungstiefe und Trennung eng beieinanderliegender Unstetigkeiten verdeutlicht werden kann.  
Aufgrund der benachbarten Spitze (Unstetigkeit 19) kommt es zu einer Überlagerung der Wavelet-Koeffizienten des Sprunges mit den Wavelet-Koeffizienten der Spitze. Während die Wavelet-Koeffizienten bis zur dritten Stufe noch räumlich getrennt sind, ist dies ab der vierten Zerlegungsstufe nicht mehr der Fall.  
Insgesamt dominiert innerhalb dieser Analyseumgebung zwar die Charakteristik des Sprungs (bis zur Punktnummer 5 in **Abb. 51.a** dritte Spalte, oberstes Diagramm), dieser wird jedoch durch die Überlagerung mit der Spitze nicht an der korrekten Stelle lokalisiert. Dies ist auch daran zu erkennen, dass im Gegensatz zur Spalte 1 die Maxima der Skalen nicht in der Mitte der Analyseumgebung liegen.
- In der **vierten Spalte** ist eine lokalisierte Unstetigkeitsstelle (erkannte Unstetigkeit 1) dargestellt, bei der es sich um eine Fehlerkennung handelt, die an dieser Stelle noch nicht aussortiert wurde. Es zeigt sich, dass nicht in allen Skalen Wavelet-Koeffizienten vorhanden sind. Außerdem lässt sich an den Amplituden erkennen, dass hier keine signifikante Änderung vorliegt.  
Hier zeigt sich der robuste Ansatz gegen Fehlerkennungen, da lediglich signifikante Änderungen im weiteren Verlauf verwendet werden.

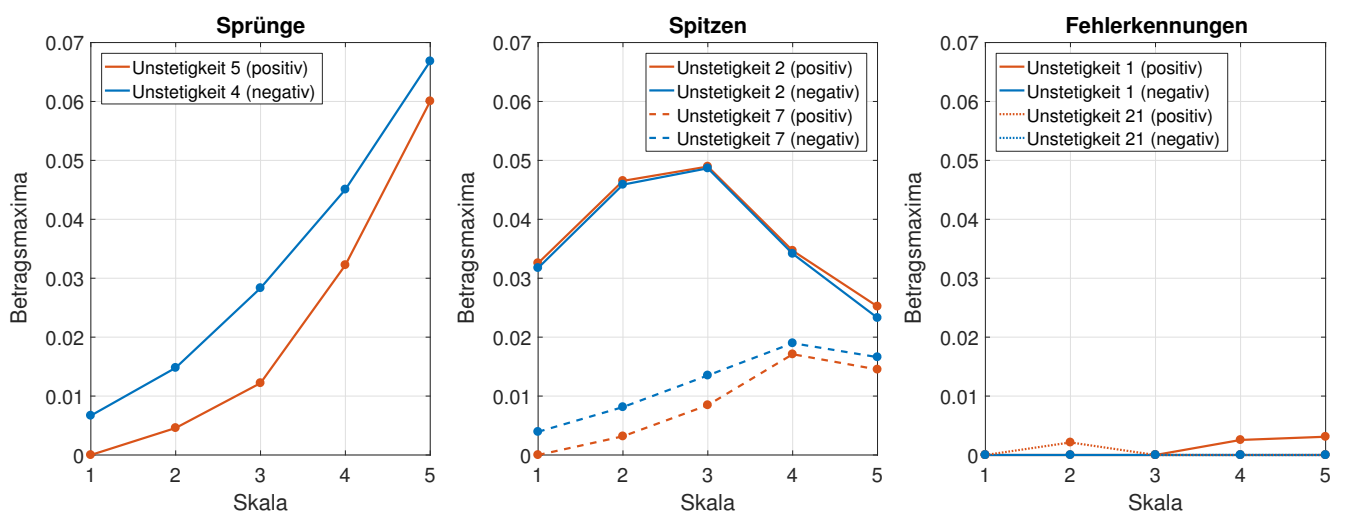
Für die eigentliche Klassifizierung der lokalisierten Unstetigkeiten werden lediglich die in **Abb. 51.a** mit einem farbigen Punkt markierten (entsprechend dem Vorzeichen) lokalen Minima und Maxima verwendet. Zur Veranschaulichung der Größenordnung der Betragsmaxima der unterschiedlichen Unstetigkeiten in den jeweiligen Zerlegungsstufen sind diese in **Abb. 51.b** in Abhängigkeit von ihrer Skala (x-Achse) in einem einheitlichen Maßstab (y-Achse) als sogenannte Betragskoeffizientenverläufe dargestellt.

Im linken Teil der **Abb. 51.b** sind die Betragskoeffizientenverläufe zweier Unstetigkeiten des Typs Sprung dargestellt. Bei diesem Typ existiert auf jeder Skala entweder ein Koeffizienten-Minimum (negativer Sprung, Unstetigkeit 4) oder ein Koeffizienten-Maximum (positiver Sprung, Unstetigkeit 5). Des Weiteren ist eine stetige Vergrößerung der Koeffizienten-Extremwerte mit der Skala zu beobachten.

In der mittleren Spalte sind die Betragskoeffizientenverläufe zweier Unstetigkeiten des Typs Spitze zu sehen. Im Unterschied zu den Sprüngen existieren hier für jede Unstetigkeit jeweils ein Koeffizienten-Minimum und ein Koeffizienten-Maximum auf jeder Skala. Die Unterscheidung, ob es sich um eine positive



**Abb. 51.a.:** Darstellung von links nach rechts: Sprung (Unstetigkeit 5), Spitze (Unstetigkeit 7), Kombination aus Sprung und Spitze (Unstetigkeit 18) und Fehlererkennung (Unstetigkeit 1).



**Abb. 51.b.:** Verlauf der Betragmaxima über die Skalen. links: Sprünge (Unstetigkeiten 4 und 5); mitte: Spitzen (Unstetigkeiten 2 und 7); rechts: Fehlererkennungen (Unstetigkeiten 1 und 21).

---

oder negative Spitze handelt, findet anhand der Reihenfolge des Auftretens der Koeffizienten-Minima bzw. Maxima statt, entsprechend **Abb. 51.a**. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist, dass die Größe der Beträge der Koeffizienten-Extremwerte keine stetige Zunahme mit der Skala zeigt, sondern in höheren Skalen wieder abnimmt.

Der rechte Teil von **Abb. 51.b** zeigt die Betragskoeffizientenverläufe von als Fehlmessungen klassifizierten Unstetigkeiten. Es treten nur vereinzelt Koeffizienten auf, die keinen charakteristischen, skalenabhängigen Werteverlauf aufweisen. Es handelt sich hierbei um Rauschanteile, die knapp über dem berechneten Schwellwert auf einzelnen Skalen vorhanden sind. An diesen Fehlerkennungen zeigt sich die Bedeutung von Schritt L2 der Lokalisierungsphase. Ohne die dort durchgeführte schwellwertbasierte Filterung würde die Anzahl an Fehlerkennungen deutlich höher liegen und die Zahl der tatsächlichen Unstetigkeiten möglicherweise sogar überschreiten.

Durch die charakteristischen Betragskoeffizientenverläufe kann sowohl die Unterscheidung in Sprünge und Spitzen als auch die Aussortierung von Fehlerkennungen realisiert werden. Diese Klassifizierung ist die Grundlage zur Bestimmung der Dimension der lokalisierten und klassifizierten Unstetigkeiten, die im nächsten Schritt durch die Anpassung synthetischer Musterfunktionen im Rahmen einer Regressionsanalyse durchgeführt wird.

## Schritt C2: Bestimmung der Dimension der Unstetigkeiten

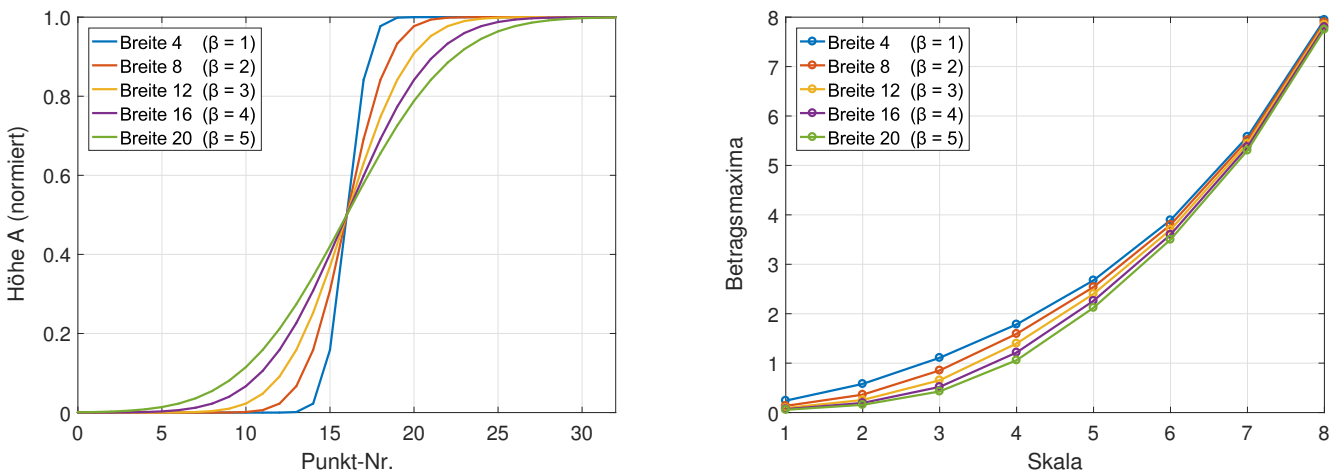
Zur Bestimmung der Dimension der lokalisierten und in Schritt C1 klassifizierten Unstetigkeiten werden typspezifische, synthetische Referenzmuster als Funktionen für die Unstetigkeiten definiert. Die Dimension dieser Funktionen lässt sich über die Parameter Breite  $B$  und Höhe  $H$  variieren, sodass unterschiedlich definierte Referenzmuster entstehen. Die Bestimmung der Dimension der Unstetigkeit erfolgt schließlich über die Anwendung eines Best-Fit-Algorithmus mit den lokalisierten Unstetigkeiten und den Referenzmustern. Dazu werden im Rahmen einer wiederholten Regressionsanalyse die konkreten Parameter Breite und Höhe für das am besten passende Referenzmuster bestimmt, aus denen sich wiederum die Ausdehnung und die Größe der lokalisierten Unstetigkeit ableiten lassen.

Die synthetischen Referenzmuster können prinzipiell frei gewählt oder aus realen Datensätzen abgeleitet werden. Nach [Bän05] bieten speziell die gaußsche Verteilungsfunktion (für den Unstetigkeitstyp Sprung) bzw. die gaußsche Dichtefunktion (für den Unstetigkeitstyp Spitze) Vorteile, da die Verteilungsfunktion sehr gut den Verlauf einer abrupten Niveauänderung ohne Rückkehr auf das Ausgangsniveau approximiert und die Dichtefunktion das entsprechende Pendant für abrupte Niveauänderungen mit Rückkehr auf das Ausgangsniveau ist. Darüber hinaus kann die Skalierung der Breite  $B$  der beiden gaußschen Funktionen über die Standardabweichung  $\beta$  erfolgen, wobei die Funktionswerte in einer Ausdehnung von  $4\beta$  diese Funktionen zu etwa 95 % charakterisieren. Dementsprechend kann gemäß [Bän05] die Ausdehnung von  $4\beta$  (= Breite  $B$ ) als Größe der Übergangszone definiert und als Basis für die Berechnung der Referenzmuster verwendet werden.

Die Bestimmung der Dimension der Unstetigkeit konzentriert sich zunächst auf die Ermittlung der Breite  $B$ . Aus diesem Grund werden Referenzmuster verschiedener Breiten  $B$  mit konstanter Höhe  $H$  generiert. In **Abb. 53** und **Abb. 54** sind jeweils im linken Diagramm die Referenzmuster für die Werte von  $\beta = 1 \dots 5$  dargestellt. Aufgrund der Definition der Übergangszone von  $4\beta$  können diese Referenzmuster zur Analyse von lokalisierten Unstetigkeiten im Messprofil verwendet werden, die eine Ausdehnung von 4 bis 20 aufeinanderfolgenden Messpunkten haben.

Da die eigentliche Best-Fit Anpassung im Frequenzbereich mit den Ergebnissen der Multiskalenanalysen der zu charakterisierenden Unstetigkeiten und den definierten Referenzmustern realisiert werden soll,

muss für jede Variante der Referenzmuster (unterschiedliche Breite) eine Multiskalenanalyse (hier bis zur Zerlegungsstufe 8) durchgeführt werden.



**Abb. 53.:** Synthetische Referenzmuster des Typs Sprung, auf der linken Seite im Ortsbereich und auf der rechten Seite als Betragskoeffizientenverlauf im Frequenzbereich.

Analog zu den Ausführungen in Schritt C1 werden erneut die Betragsmaxima der Wavelet-Koeffizienten aus jeder der insgesamt acht Skalen selektiert und als Betragskoeffizientenverläufe dargestellt, siehe **Abb. 53** und **Abb. 54** jeweils auf der rechten Seite.

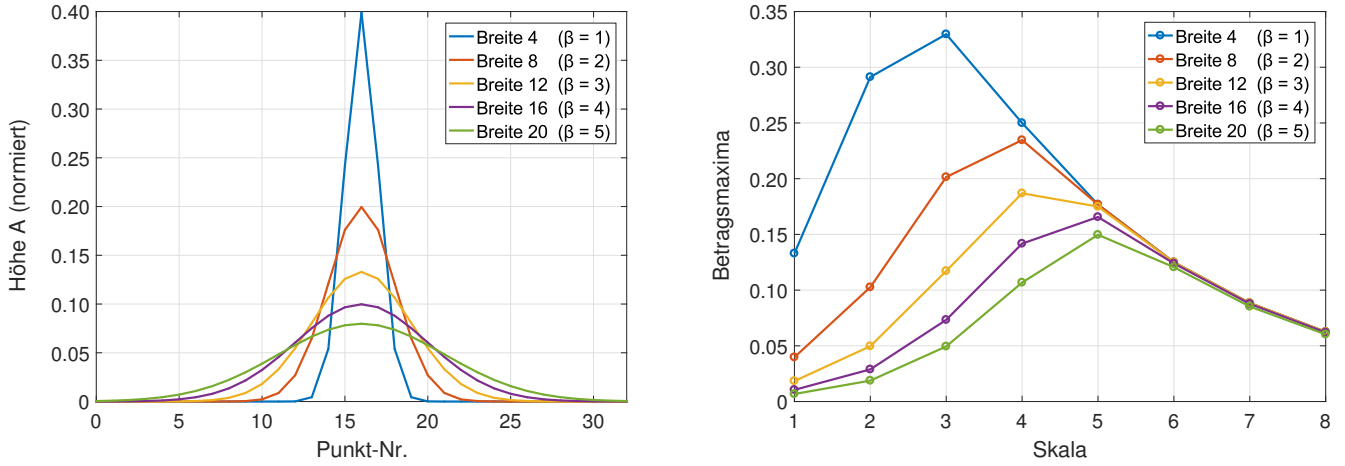
Bei der Interpretation der Betragskoeffizientenverläufe muss sowohl bei den Unstetigkeiten als auch bei den Referenzmustern berücksichtigt werden, dass sich die Anzahl der Punkte zur Berechnung eines Wavelet-Koeffizienten der  $m$ -ten Skala (bei einer dyadischen Skalenaufteilung) aus der Beziehung  $2^m$  ergibt und als Filterlänge bezeichnet wird. Übersteigt diese Punktzahl (Filterlänge) die Breite der Übergangszone von  $4\beta$ , werden die Betragsmaxima aller nachfolgenden Skalen hauptsächlich durch die Höhe  $H$  der Unstetigkeit bzw. des Referenzmusters bestimmt, siehe auch [Bän05, S. 222].

Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass solange die Filterlänge einer Skala die Breite der Übergangszone unterschreitet, der Betragskoeffizientenverlauf maßgeblich durch den gesuchten Parameter  $\beta$  bestimmt wird, siehe [Neu08, S. 100].

Da sich die Betragsmaxima der verschiedenen Breiten eines Referenzmusters hauptsächlich auf den unteren Skalen unterscheiden, ist hier vorrangig die Information zur Bestimmung des Parameters  $\beta$  enthalten, vergleiche **Abb. 53** und **Abb. 54** jeweils auf der rechten Seite.

Da alle Betragsmaxima proportional zur Höhe  $H$  sind, hängen die Quotienten der Betragsmaxima aufeinanderfolgender Skalen ausschließlich von  $\beta$  ab, siehe [Bän05]. Dies ermöglicht die Bestimmung der Breite durch den Vergleich mit Referenzmustern konstanter Höhe  $H$  im Rahmen einer Regressionsanalyse. Die Quotienten der Betragsmaxima der entsprechenden Skalen des gewählten Referenzmusters zu den Betragsmaxima in der Analyseumgebung ermöglichen anschließend einen Rückschluss auf die Höhe  $H$ . Analoge Betrachtungen können auch für Unstetigkeiten des Typs Spitze durchgeführt werden. In **Abb. 54** lässt sich der charakteristische Verlauf der Betragsmaxima erkennen. Je schmaler die Spitze, desto niedriger ist die Skala, in der die halbe Filterlänge die Breite der Spitze erreicht ( $4\beta$  ungefähr  $2^{m-1}$ ). Dies zeigt sich in **Abb. 54** auf der rechten Seite, hier nehmen die Beträge bei einer Breite von 4 ( $\beta = 1$ ) ab der 3. Skala und bei einer Breite von 20 ( $\beta = 5$ ) ab der 5. Skala wieder ab.

Auch hier findet eine Konzentration der Information über die Breite der Referenzmuster in den unteren Skalen der Betragskoeffizientenverläufe statt. Somit ist ebenfalls eine sequenzielle Bestimmung der Dimensionsparameter möglich. Durch die Verwendung der gaußschen Dichtefunktion als Referenzmuster



**Abb. 54.:** Synthetische Referenzmuster des Typs Spitze, auf der linken Seite im Ortsbereich und auf der rechten Seite als Betragskoeffizientenverlauf im Frequenzbereich.

(vergleiche **Abb. 54** linke Seite) ist der zweite zu bestimmende Parameter nicht die Höhe  $H$ , sondern zunächst die Fläche  $F$ , welche proportional zu den Betragmaxima ist. Die Höhe  $H$  der Spitze lässt sich aus der bestimmten Fläche  $F$  wie folgt ableiten:

$$H \approx \frac{0,4 \cdot F}{\beta}. \quad (54)$$

Mithilfe dieser synthetischen Referenzmuster besteht nun die Möglichkeit zusätzlich zur Lokalisierung und Klassifizierung der Unstetigkeiten, basierend auf den Verläufen der Betragmaxima, deren Höhe und Breite zu schätzen.

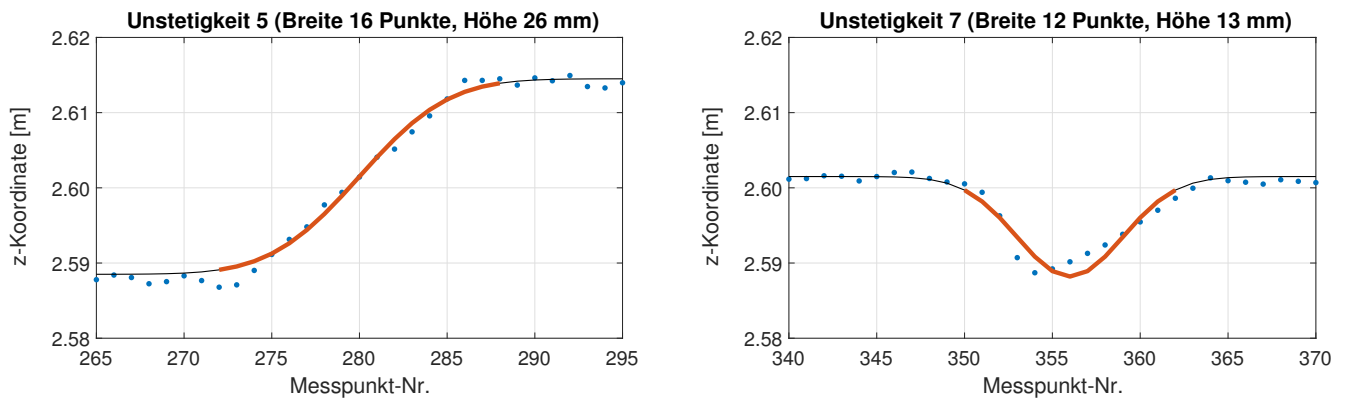
Durch die Bestimmung dieser Parameter können zwei zentrale Aufgaben gelöst werden: Mit der bestimmten Breite kann die Trennung der Messpunkte erfolgen und so geklärt werden, ob sie von einer Unstetigkeit betroffen sind oder nicht. Über die Höhe der Niveauänderungen können zusätzlich Fehlmessungen von den Details der Oberflächenstruktur separiert werden. Dazu wird der Verlauf der Betragmaxima über die Skalen im Rahmen einer Regressionsanalyse mit den zuvor generierten Referenzmustern verglichen.

Das Ziel dieser Regressionsanalyse ist es, die am besten zum Signalausschnitt  $y$  passende Musterfunktion  $a_i$  einer endlichen Anzahl  $i$  auszuwählen. Dies wird in Form einer Projektion realisiert. Der entsprechende Ablauf soll hier kurz skizziert werden, weitere Details finden sich im Anhang A.4:

- Der Vektor  $y$  enthält die skalenabhängigen Beträge der maximalen Wavelet-Koeffizienten der zu analysierenden Unstetigkeit.
- Die Vektoren  $a_i$  enthalten die skalenabhängigen Beträge der maximalen Wavelet-Koeffizienten von  $i$  Referenzmustern verschiedener Breiten und konstanter Höhe  $H = 1$  bzw. konstanter Fläche  $F = 1$ .
- Die Vektoren werden über die folgende Norm miteinander verknüpft:  $\|y - \lambda a_i\|$ .

Die Projektion bestimmt den Faktor  $\lambda$  und den Index  $i$ , für die diese Norm minimal wird. Der Index  $i$  spezifiziert dabei das Referenzmuster, welches entsprechend seiner Breite bestmöglich zu der Unstetigkeit passt.  $\lambda$  kann dabei als Maßstabsfaktor interpretiert werden, der aufgrund der Verwendung von Referenzmustern mit  $H = 1$  bzw.  $F = 1$  direkt einen Wert für die Höhe bzw. Fläche der Unstetigkeit angibt. In **Abb. 55** ist exemplarisch das Ergebnis der Bestimmung der Dimension für zwei Unstetigkeiten gezeigt. Die Messpunkte sind in blau und die geschätzte Funktion in schwarz dargestellt. Im Bereich der geschätzten Breite der Unstetigkeit ist die Funktion zusätzlich in rot hervorgehoben.

Aus den Abweichungen der Betragskoeffizientensumme des gewählten Referenzmusters zur Betragskoeffizientensumme der Unstetigkeit kann darüber hinaus eine Genauigkeitsangabe für die Anpassung abgeleitet werden, die in diesen Fällen bei ungefähr 0,7 mm liegt.



**Abb. 55.:** Schätzung der Dimension für zwei beispielhafte Unstetigkeiten.

### 3.1.4 Einsatz zur Analyse von Messprofilen

Im vorherigen Abschnitt wurden die wichtigsten Ansätze zur Realisierung eines Analysealgorithmus für Messprofile beschrieben. Die Analyse erfolgt dabei durch die Lokalisierung und Charakterisierung der informationshaltigen Positionen im Messprofil und wird in Form von ausgewählten Parametern (siehe z. B. **Tab. 39**) quantifiziert.

Im Folgenden soll nun gezeigt werden, wie mithilfe ausgewählter Unstetigkeitsparameter (Position, Typ, usw.) die gewonnene Information für die Überwachung von Tragwerken weiter aufbereitet werden kann. Auf Grundlage der Analyseergebnisse sollen Entscheidungsregeln zum Umgang mit Unstetigkeiten definiert werden.

Wie bereits zu Beginn des Abschnittes 3.1 dargestellt, ergeben sich bei der Überwachung von Tragwerken zwei generelle Problemstellungen:

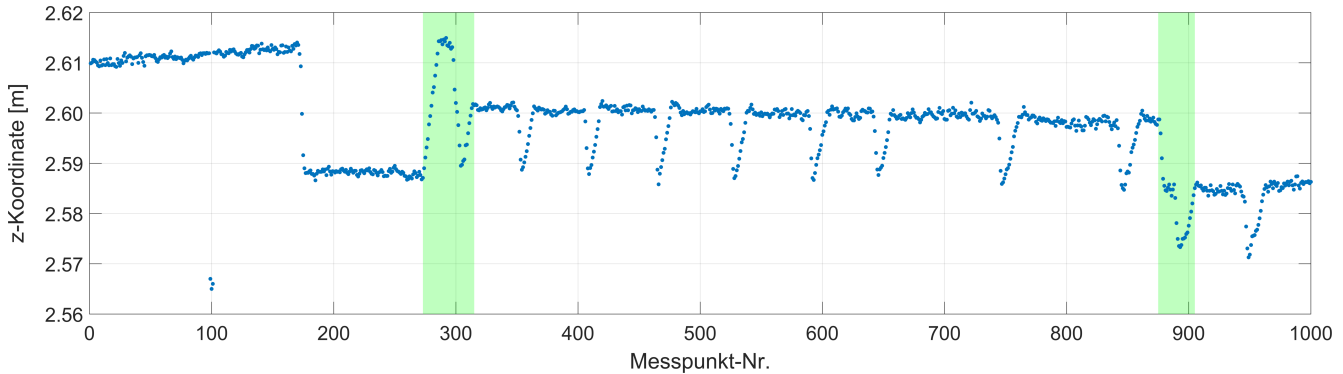
1. Ableitung relevanter Messpunkte bezüglich des Tragwerkes (Tragwerksprofile) aus den ursprünglichen Messprofilen.
2. Segmentierung des abgeleiteten Tragwerksprofils anhand der Struktur der Tragwerksoberfläche. Zusätzlich können weitere Aspekte, wie beispielsweise Montagepunkte von Vergleichssensoren oder andere strukturdynamisch bedeutsame Stellen, von Interesse sein.

Gemäß dieser zweistufigen Aufgabendefinition ist eine entsprechende zweistufige Realisierung des Analysealgorithmus sinnvoll:

1. In der **ersten** Stufe werden zunächst lediglich die im Messprofil gefundenen Unstetigkeiten vom Typ Spitze zur Erkennung und Eliminierung von Fehlmessungen verwendet und somit der Übergang zum Tragwerkprofil geschaffen.
2. Daran anschließend wird in der **zweiten** Stufe die Segmentierung des Tragwerkprofils durchgeführt, wobei hauptsächlich die Unstetigkeiten des Typs Sprung verwendet werden. Falls keine signifikanten Unstetigkeiten im Tragwerkprofil vorhanden sind, entsteht in diesem Schritt lediglich ein Segment.



Nachdem in den bisherigen Ausführungen gezeigt wurde, wie sich einzelne Unstetigkeiten automatisch lokalisieren und charakterisieren lassen, werden im Folgenden speziell „problematische“ Unstetigkeiten betrachtet. In **Abb. 56** sind zwei Bereiche des Messprofils grün gekennzeichnet, in denen mehrere Unstetigkeiten nahezu an der gleichen räumlichen Position auftreten und sich so nicht oder nur sehr schwer separieren lassen.



**Abb. 56.:** Messprofil eines Brückenhauptträgers mit markierten problematischen Unstetigkeiten.

Im Folgenden soll gezeigt werden, wie sich solche Problemstellen über eine mehrstufige Anwendung des Analysealgorithmus erfolgreich erfassen lassen. In jeder Stufe wird der Algorithmus dabei entsprechend den spezifischen Anforderungen angepasst. Welche Methoden dabei wann zum Einsatz kommen, soll nun detailliert beschrieben werden:

Dieses Separationsproblem ist als Aufgabenstellung der Lokalisierungsphase des Algorithmus zuzuordnen. Zentraler Bestandteil dieser Phase ist die Generierung und die Analyse der Betragskoeffizientensumme (Abschnitt 3.1.3.1 Schritt L3 und L4), welche deswegen im Fokus der folgenden Ausführungen steht. Zunächst werden Möglichkeiten zur Generierung der Betragskoeffizientensumme diskutiert und gezeigt, wie sich diese für die Spezialisierung des Algorithmus nutzen lassen.

In **Abb. 57** sind zwei Realisierungen der Betragskoeffizientensumme gezeigt. Dazu wurde im oberen Diagramm die Berechnung ohne die skalenabhängige Gewichtung zur Hervorhebung von Spitzen durchgeführt, während im unteren Diagramm die in Abschnitt 3.1.3.1 angesprochene skalenabhängige Gewichtung verwendet wurde. Diese wird mit der Inversen der jeweiligen Filterlänge ( $2^m$ ) der entsprechenden Skala ( $m = 1 \dots n$ ,  $n$  = Zerlegungstiefe) durchgeführt. Dadurch werden bei der Bildung der Betragskoeffizientensumme höhere Skalen stärker gedämpft.

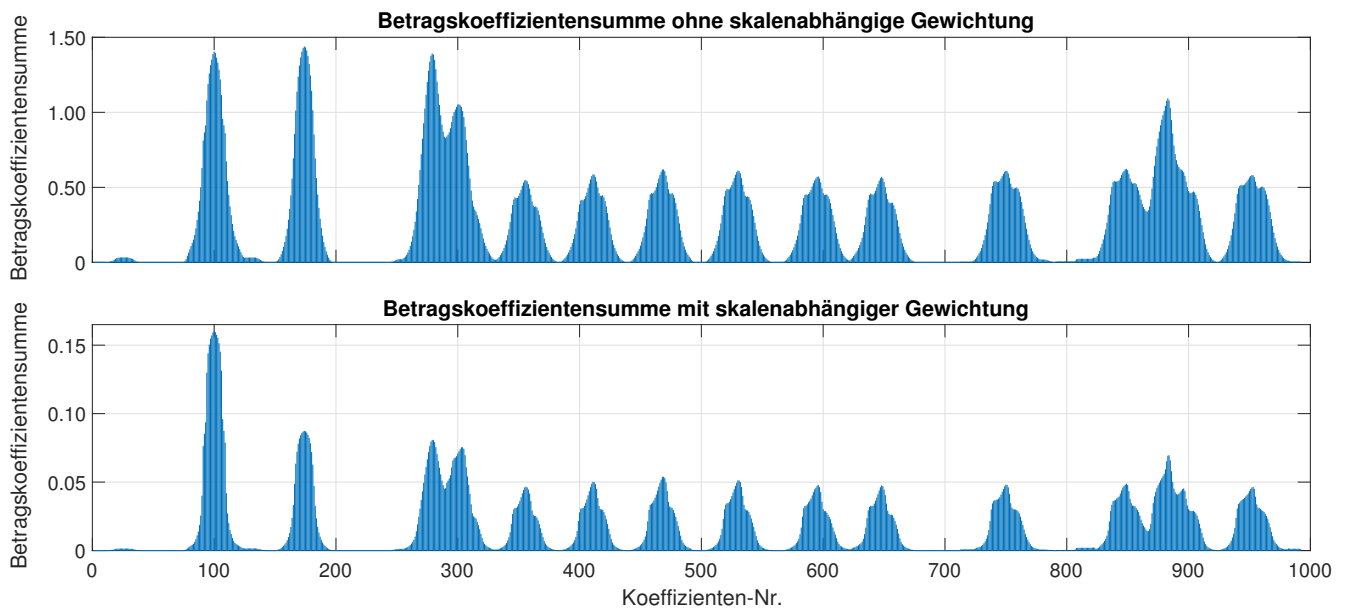
Es kommt somit zu einer Abschwächung von Sprüngen, da diese entsprechend **Abb. 53** auf der rechten Seite auch in höheren Skalen ansteigende Betragskoeffizientenverläufe aufweisen. Im Gegensatz dazu nehmen die Amplituden der Betragskoeffizientenverläufe von Spitzen in höheren Skalen wieder ab, siehe **Abb. 54** auf der rechten Seite.

In **Abb. 57** ist das variierende Amplitudenlevel aufgrund der skalenabhängigen Gewichtung der beiden Betragskoeffizientensummen zu erkennen. Dabei muss auf die unterschiedlich skalierten y-Achsen der beiden Diagramme geachtet werden, da nur so die Details der beiden Betragskoeffizientensummen zu erkennen sind.

Die eigentliche Auswirkung der Gewichtung auf Sprünge bzw. Spitzen ist insbesondere an den ersten beiden relevanten Unstetigkeiten im Punktnumbereich 100 bis 200 zu erkennen. Im oberen Diagramm erreichen die beiden Unstetigkeiten in Form von Sprung und Spitze dasselbe Niveau, wobei die Spitze im Messprofil (Ortsbereich) deutlich höher ist als der Sprung. Im unteren Diagramm hebt sich hingegen die Spitze bei der Punktnummer 100 vom Sprung bei der Punktnummer 180 ab.

Ein weiterer signifikanter Unterschied ist bei den dicht beieinander liegenden Unstetigkeiten im Bereich





**Abb. 57.:** Bestimmung der Betragskoeffizientensumme ohne skalenabhängige Gewichtung (oben) und mit skalenabhängiger Gewichtung (unten).

um Punktnummer 900 erkennbar. In beiden Diagrammen dominiert zwar der zuerst auftretende Sprung, im Gegensatz zum oberen Diagramm kann durch die skalenabhängige Gewichtung jedoch auch die Spitze als kleines lokales Maximum hervorgehoben werden.

Insgesamt betrachtet zeigt sich durch die Verwendung der skalenabhängigen Gewichtung nicht nur eine Abschwächung der Dominanz von Unstetigkeiten des Typs Sprung, sondern auch eine bessere Separationsmöglichkeit nahe beieinander liegender Unstetigkeiten unterschiedlichen Typs.

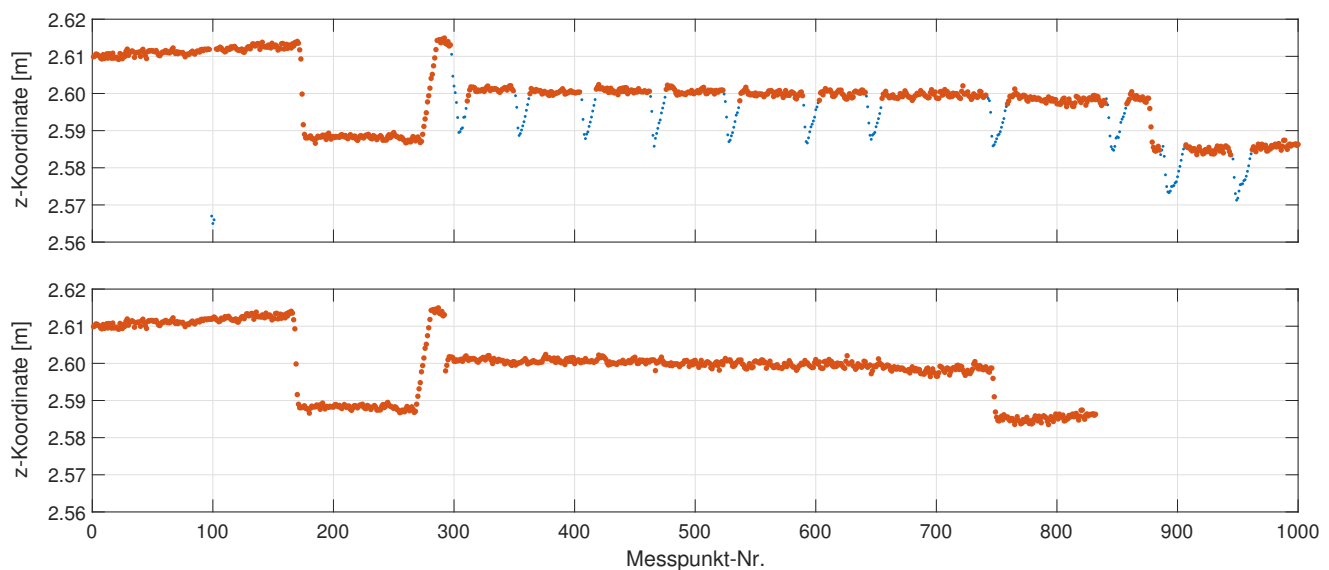
## Stufe 1

Da in der **ersten** Stufe lediglich Unstetigkeiten des Typs Spitze analysiert werden, kommt die zuvor diskutierte und in **Abb. 57** unten dargestellte skalenabhängige Gewichtung bei der Bildung der Betragskoeffizientensumme zur Hervorhebung von Spitzen zum Einsatz. Mit der Lokalisierung und den ermittelten Breiten der Spitzen können die betroffenen Profilmesspunkte eliminiert werden. In **Abb. 58.a** ist im oberen Diagramm die Überlagerung des ursprünglichen Messprofils (blau) mit dem bereinigten Messprofil (rot) dargestellt. Der Vergleich der beiden Messprofile zeigt die nahezu vollständige Entfernung der Spitzen.

Darüber hinaus ist erkennbar, dass alle Profilmesspunkte entfernt wurden, die einer Unstetigkeit zugeordnet sind, und zwar unabhängig davon, ob es sich bei diesen um Details der Tragwerksoberfläche oder um Fehlmessungen handelt. Die strikte Elimination wird durch die unvermeidlich an Unstetigkeiten auftretenden „Mixed Pixel“ (siehe Anhang A.1) motiviert und verhindert eine Verfälschung der bei der folgenden räumlichen Prozessierung abgeleiteten Messgrößen.

Im unteren Diagramm in **Abb. 58.a** ist das Endergebnis der ersten Stufe gezeigt. Das Messprofil wurde um sämtliche Spitzen reduziert und kann so an die zweite Stufe des Analysealgorithmus übergeben werden.

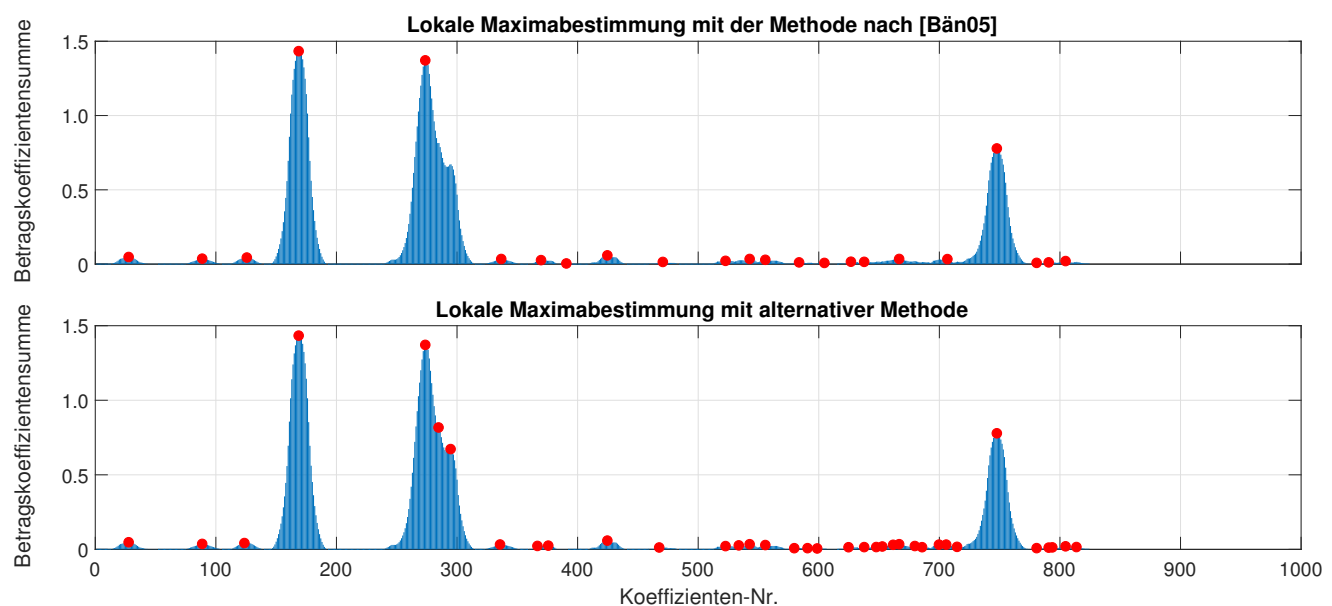
Bevor auf die Segmentierung des reduzierten Messprofils in der zweiten Stufe eingegangen wird, sollen zunächst Möglichkeiten zur Analyse der Betragskoeffizientensumme diskutiert werden, wobei die Bestimmung der lokalen Maxima im Fokus steht.



**Abb. 58.a.:** Ergebnis der ersten Stufe (Eliminierung von Fehlmessungen): Das ursprüngliche Messprofil ist in blau dargestellt, das Ergebnis nach der Eliminierung von Fehlmessungen in rot.

Entsprechend den Ausführungen aus Abschnitt 3.1.3.1 Schritt L4 zur Bestimmung der lokalen Maxima wurde bisher eine auf [Bän05] basierende Implementierung vorgestellt. Da die Maximabestimmung den finalen Schritt der Lokalisierungsphase darstellt, ist sie für die Analyse der Messprofile von zentraler Bedeutung. Eine differenzierte Betrachtung dieses Schrittes soll mögliche Optionen und ein vorhandenes Optimierungspotenzial aufzeigen.

Dazu wird zunächst eine weitere Methode zur Bestimmung der lokalen Maxima eingeführt. Bei dieser wird ein lokales Maximum als ein Messpunkt definiert, der größer ist als seine beiden Nachbarpunkte. Dieser einfache Ansatz in Kombination mit der Glättung der gleitenden Summenbildung führt zu den in **Abb. 58.b** im unteren Diagramm dargestellten lokalen Maxima. In der oberen Zeile werden die lokalen Maxima mit der Methode aus Abschnitt 3.1.3.1 Schritt L4 bestimmt.

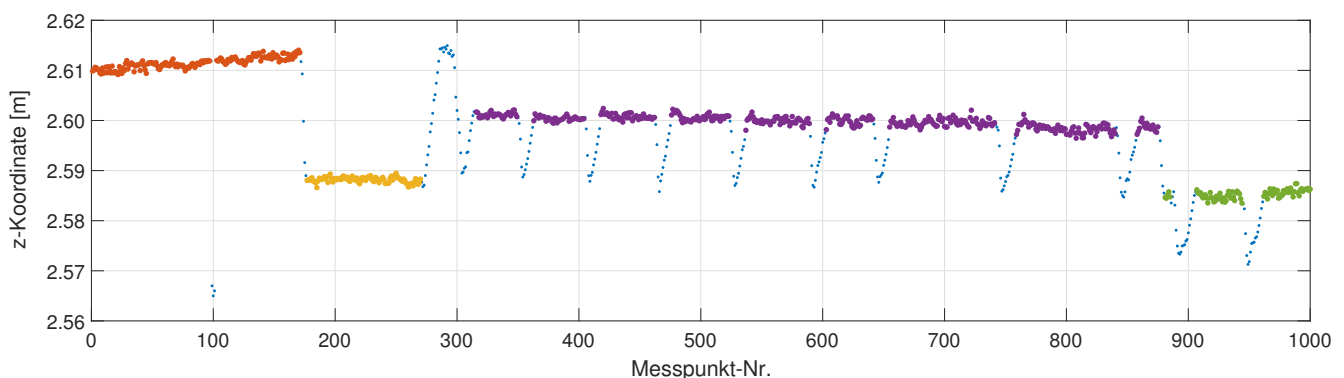


**Abb. 58.b.:** Betragskoeffizientensumme oben: mit markierten Maxima nach der Methode aus [Bän05] bestimmt; unten: mit markierten Maxima, die größer sind als ihre Nachbarpunkte.

Es zeigt sich, dass je nach Umsetzung der Maximasuche die Anzahl und die Lage der gefundenen Maxima variieren. Die drei signifikantesten Maxima werden hingegen durch beide Methoden an der identischen Stelle ermittelt, siehe **Abb. 58.b**. Bei einer detaillierteren Betrachtung der Diagramme fällt jedoch auf, dass die zweite Methode mehr Details erfasst, gerade bei nahe beieinanderliegenden Maxima, wie z. B. im Bereich um den Messwert 300. Bei dieser Methode treten jedoch auch mehr Fehlerkennungen auf. Durch die Aussortierung dieser Fehlerkennungen in der Charakterisierungsphase spielen diese jedoch lediglich eine untergeordnete Rolle. Somit kann durch den Einsatz alternativer Methoden zur Bestimmung der lokalen Maxima eine Verbesserung der Ergebnisse der Lokalisierungsphase erreicht werden.

## Stufe 2

Die in der ersten Stufe bereinigten Messprofile (siehe **Abb. 58.a**) werden in der **zweiten** Stufe unter Verwendung der alternativen Methode zur Maximabestimmung auf Unstetigkeiten in Form von Sprüngen untersucht. Eine Gewichtung der Skalen findet dabei nicht statt. Mit den gefundenen Sprüngen wird die eigentliche Segmentierung durchgeführt, d. h. die Profilmesspunkte zwischen zwei Sprüngen werden einem Profilsegment zugeordnet, siehe **Abb. 59**. Etwaige noch vorhandene Spitzen werden ebenfalls aufgedeckt und können entsprechend berücksichtigt werden.



**Abb. 59.:** Ergebnis der zweiten Stufe (Segmentierung): Der Messprofilausschnitt ist in vier Segmente aufgeteilt und entsprechend farblich hervorgehoben. Das ursprüngliche Messprofil ist in blau dargestellt.

Das Endergebnis (Segmentierung) der zweiten Stufe der automatischen Analyse des Messprofils ist in **Abb. 59** gezeigt. Sämtliche Profilmesspunkte, die einer Unstetigkeit zugeordnet werden konnten, wurden eliminiert, dies gilt sowohl für Spitzen als auch für Sprünge. Anschließend wurde basierend auf den aufgedeckten Sprüngen eine Segmentierung des Messprofils entsprechend der Tragwerksoberfläche durchgeführt.

## Fazit

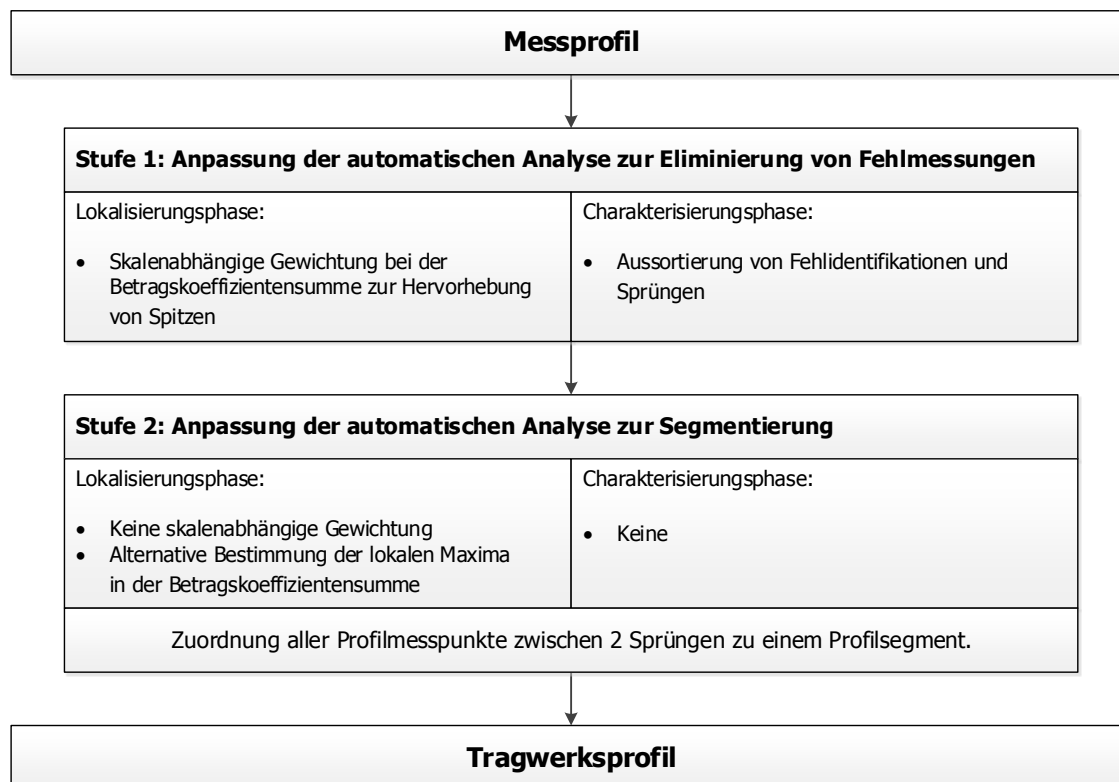
In **Abb. 60** ist der zweistufige Ablauf noch einmal schematisch dargestellt. Durch diesen Aufbau können problematische Kombinationen von Unstetigkeiten unterschiedlichen Typs identifiziert und separiert werden. Die in der ersten Stufe durchgeführte skalenabhängige Gewichtung zur Berechnung der Betragsskoeffizientensumme verbessert zunächst die Lokalisierung von Unstetigkeiten des Typs Spitze, insbesondere in direkter Nachbarschaft zu ansonsten dominierenden Sprüngen.

In beiden Stufen können alternative Methoden zur Bestimmung der lokalen Maxima eine verbesserte

Separierung von Unstetigkeiten des gleichen Typs ermöglichen. Durch den zweistufigen Aufbau wird nicht nur die Separierung verbessert, sondern auch die Robustheit des Algorithmus gesteigert und somit die weitestgehend korrekte Identifikation aller informationshaltiger Positionen im Messprofil gewährleistet.

Darüber hinaus wird durch die Segmentierung in der zweiten Stufe die Grundlage für weitergehende räumliche Prozessierungsschritte geschaffen. Dadurch kann der Übergang von komplexen Messprofilen zu einfachen Tragwerksprofilen realisiert werden.

Im folgenden Abschnitt werden basierend auf dieser Vorverarbeitung die eigentlichen räumlichen Prozessierungsmethoden vorgestellt.



**Abb. 60.:** Automatische Analyse von Messprofilen.

---

## 3.2 Räumliche Prozessierung

---

Mit der automatischen Analyse der Messprofile wurde der Übergang zu Tragwerksprofilen geschaffen, d. h. es werden Profile abgeleitet, die nur noch aus tragwerksrelevanten Messpunkten bestehen. Darin sind keine Punkte mehr enthalten, die Fehlmessungen, Verdeckungen oder nicht zum Tragwerk gehörenden Objekten zugeordnet werden. Darüber hinaus beinhaltet die automatische Analyse bei strukturierten Tragwerksprofilen auch eine automatische Segmentierung, und zwar unter Verwendung der Details der Tragwerksoberfläche. Dabei werden die Tragwerksprofile in Tragwerkssegmente aufgeteilt. In den folgenden Ausführungen schließt der Begriff Tragwerksprofil daher immer auch eine etwaige Segmentierung in Tragwerkssegmente mit ein.

Die Aufgabe der anschließenden räumlichen Prozessierung besteht darin, die für die Tragwerksüberwachung relevanten Größen und deren Unsicherheiten aus den Tragwerksprofilen abzuleiten. Solche Größen können beispielsweise Koordinaten, Neigungen oder Krümmungen von bzw. in einzelnen Tragwerkspunkten sein. Aus mathematischer Sicht basiert diese Prozessierung auf einer möglichst optimalen Approximation räumlicher Punktfolgen, die in Form von Tragwerksprofilen vorliegen.

Zur Realisierung der räumlichen Prozessierung werden im Folgenden drei Ansätze vorgestellt:

1. Approximation des Tragwerksprofils durch räumliche Klassen (Abschnitt 3.2.1):  
Ableitung eines Klassenrepräsentanten aus einer räumlich verteilten Menge an Tragwerkspunkten.
2. Approximation des Tragwerksprofils mit B-Spline-Funktionen (Abschnitt 3.2.2):  
Raumkontinuierliche Modellierung des Tragwerksprofils mit einem B-Spline und anschließende Diskretisierung an definierten Positionen.
3. Approximation des Tragwerksprofils mit Wavelets (Abschnitt 3.2.3):  
Einsatz der Wavelet-Transformation bzw. Wavelet-Synthese zur Approximation des Tragwerksprofils und anschließende Interpolation der diskreten Punktmenge an definierten Positionen.

---

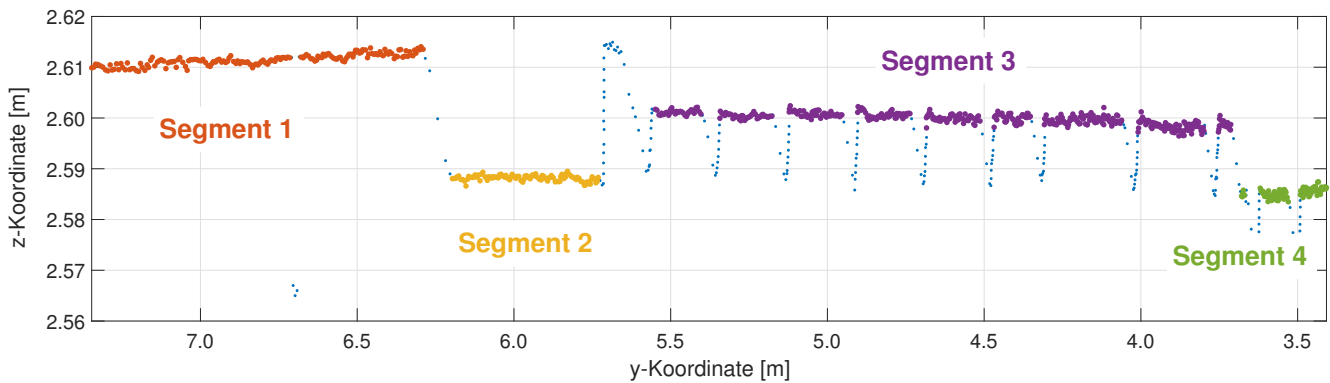
### 3.2.1 Approximation von Tragwerksprofilen durch räumliche Klassenbildung

---

Bei der räumlichen Klassenbildung wird das Tragwerksprofil in separate Klassen aufgeteilt, siehe auch [Heu+13, S. 655 f.]. Die Tragwerkspunkte innerhalb einer solchen räumlichen Einheit werden gemeinsam prozessiert mit dem Ziel, eine abgeleitete Messgröße (Repräsentant) pro Klasse zu erzeugen. Durch die explizite Definition der räumlichen Einheit kann direkt festgelegt werden, welche Punkte des Tragwerksprofils in die Berechnung eines Repräsentanten mit eingehen.

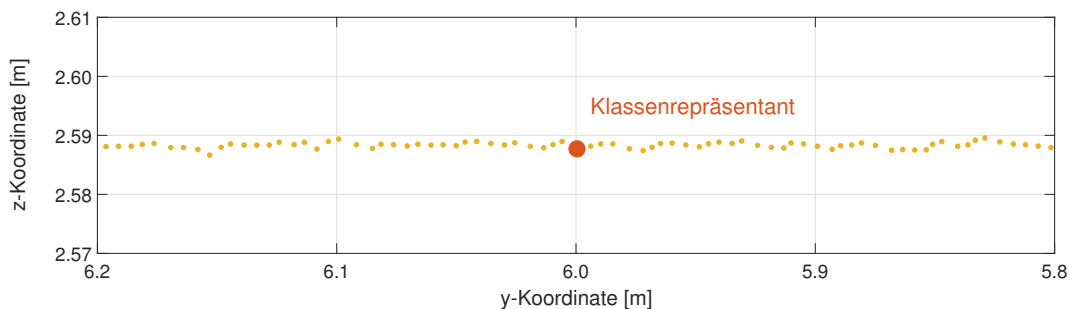
Mit dieser einfachen Definition ist die räumliche Klassenbildung ein nahezu universell einsetzbarer Prozessierungsansatz, dessen Rechenaufwand sehr niedrig ist, insbesondere wenn als Klassenrepräsentant z. B. der Mittelwert oder der Median verwendet wird. Der hier vorgestellte Ansatz geht jedoch über die Verwendung eines gleitenden Mittelwertfilters bzw. Medianfilters hinaus, da auch die Parameter Neigung oder Krümmung als Klassenrepräsentant verwendet werden können.

In **Abb. 62.a** ist ein segmentiertes Tragwerksprofil dargestellt, das mittels der automatischen Analyse eines Messprofils erzeugt wurde. Die vier farbig gekennzeichneten und nummerierten Segmente sind durch konstruktive Details der Tragwerksoberfläche induziert. Für die weitere Betrachtung der räumlichen Klassenbildung wird das Segment 2 verwendet. Da dieses Segment nur eine sehr begrenzte räumliche Ausdehnung besitzt, wird es im Folgenden als eine räumliche Klasse betrachtet. Grundsätzlich muss ein Segment aber nicht mit einer Klasse übereinstimmen, sondern kann auch aus einer Vielzahl von Klassen bestehen.



**Abb. 62.a.:** Endergebnis der automatischen Analyse eines Messprofils mit farblich hervorgehobenen und beschrifteten Segmenten.

Durch die vorangegangene Analyse ist gewährleistet, dass zur räumlichen Klassenbildung nur „glatt“ verlaufende Bereiche im Tragwerksprofil verwendet werden, die in der Regel horizontal bzw. vertikal (in Richtung der Koordinatenachsen) ausgerichtet sind. Eine etwaige Neigung der Tragwerksoberfläche kann jedoch entsprechend berücksichtigt werden.



**Abb. 62.b.:** Profilmesspunkte innerhalb des Segmentes 2 inklusive des durch Mittelung erzeugten Klassenrepräsentanten.

Aus den Koordinaten aller Profilmesspunkte innerhalb der Klasse wird eine repräsentative Größe abgeleitet, und als Klassenrepräsentant bezeichnet, siehe **Abb. 62.b**. Dieser kann in Form des arithmetischen Mittelwerts, des Medians, der Neigung oder der Krümmung im Rahmen einer Parameterschätzung bestimmt werden. Entsprechend der Wahl des Klassenrepräsentanten können zusätzlich statistische Größen bzw. Unsicherheitsmaße berechnet werden.

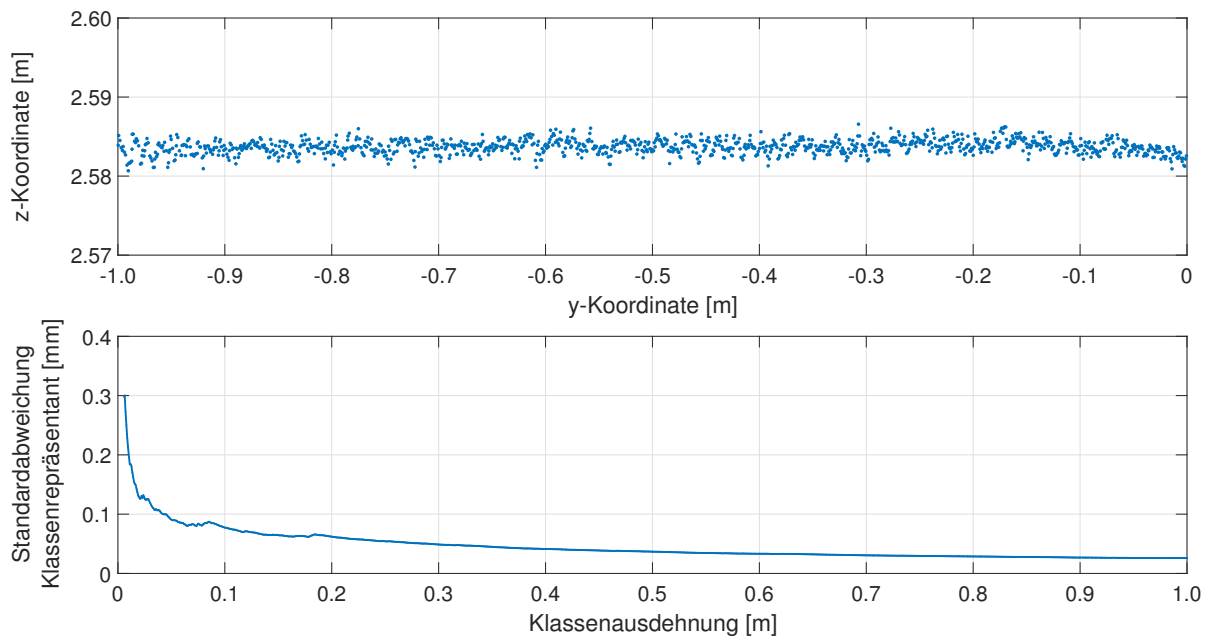
Die Schätzung und deren Unsicherheit wird durch die Anzahl der verwendeten Tragwerkspunkte und somit durch die räumliche Ausdehnung der Klasse maßgeblich beeinflusst. Ist die maximale Ausdehnung einer Klasse innerhalb eines Segments nicht durch spezielle Vorgaben der Tragwerksüberwachung (z. B. Montagepunkte von Vergleichssensoren, o. ä.) festgelegt, so ist diese grundsätzlich nur durch die folgende Forderung begrenzt:

Die Koordinatenwerte der Tragwerkspunkte variieren nur zufällig innerhalb der Größe des Messrauschens, d. h. es gibt keine Verformung des zu analysierenden Tragwerksausschnitts (= Klasse) während der Messdauer des Klassenbereiches (quasistatisches Klassenverhalten).

Im Folgenden sollen die optimale Wahl der Klassenausdehnung und etwaige begrenzende Faktoren detaillierter betrachtet werden. In **Abb. 63** ist im oberen Diagramm ein beispielhafter Ausschnitt aus



einem Tragwerksprofil mit einer Ausdehnung von 1 m gezeigt. Im Diagramm darunter ist der Verlauf der Standardabweichung des Klassenrepräsentanten in Abhängigkeit der räumlichen Ausdehnung der zugrunde liegenden Klasse dargestellt.



**Abb. 63.:** oben: Räumliche Ausdehnung eines Profilausschnittes; unten: Standardabweichung des Mittelwertes bei zunehmender Klassenausdehnung (maximal 1 m).

Ab einer Klassenausdehnung von ca. 0,15 m (entspricht einer Anzahl von ca. 180 Tragwerkspunkten) verringert sich in diesem Beispiel die Unsicherheit des Klassenrepräsentanten nicht mehr signifikant. Inwieweit sich eine solche optimale Klassenausdehnung bei der Überwachung von Tragwerken erreichen lässt, hängt im Wesentlichen von den Eigenschaften des Tragwerks, wie der Bewegungsgeschwindigkeit und der Oberflächenstruktur ab. Darüber hinaus spielen auch die Parameter der Profilschannermessung, wie die Messentfernung, die Rotationsgeschwindigkeit und die entsprechende Lasermessrate eine Rolle, siehe Abschnitt 2.2.1.

Zur Verdeutlichung dieser Problematik sind in **Tab. 64** vier Messszenarien mit der aufgrund der sequenziellen Messung zu erwartenden Unsicherheit für den jeweiligen Klassenrepräsentanten dargestellt. Bei allen Messszenarien wird eine Klassenausdehnung von 0,15 m aus den vorangegangenen Ausführungen übernommen. Darauf basierend werden die oben genannten Parameter variiert, beginnend mit der Messentfernung (Zeile 2). Durch die Variation dieses Parameters verändert sich der Winkelbereich, in dem die Klasse abgebildet wird (Zeile 3). In Kombination mit einer Änderung der Rotationsgeschwindigkeit des Profilschanners von 50 Hz auf 100 Hz (Zeile 4) verringert sich die Dauer der sequenziellen Messung des Klassenbereichs (Zeile 5). Basierend auf dieser Messdauer ist die Bewegung der Messpunkte innerhalb der Klasse und damit die Unsicherheit aufgrund der sequenziellen Messung außerdem noch abhängig von der individuellen Bewegungsgeschwindigkeit des Tragwerks (Zeile 6 und 7).

Mit diesen Angaben lassen sich erste Überlegungen hinsichtlich der Planung von Messeinsätzen und der zu erwartenden Unsicherheiten bei der Tragwerksüberwachung anstellen. Es zeigt sich, dass die räumliche Klassenbildung zwar nahezu universell einsetzbar ist, jedoch eine genaue Abwägung der definierbaren Parameter erfolgen muss, damit die prädierten Messwerte bzw. bestimmten Parameter entsprechend der getroffenen Annahmen einen Bezug zur Realität haben.

	1	2	3	4
Klassenausdehnung am Tragwerk	0,15 m	0,15 m	0,15 m	0,15 m
Messentfernung zum Tragwerk	3 m	10 m	10 m	10 m
Winkelbereich der Klasse	3,18 Gon	0,95 Gon	0,95 Gon	0,95 Gon
Rotationsgeschwindigkeit des Profilsanners	50 Hz	50 Hz	50 Hz	100 Hz
Messdauer für den Klassenbereich	0,16 ms	0,05 ms	0,05 ms	0,02 ms
Bewegungsgeschwindigkeit des Tragwerks	1 m/s	1 m/s	5 m/s	5 m/s
Unsicherheit der Tragwerkspunkte	0,16 mm	0,05 mm	0,25 mm	0,12 mm

**Tab. 64.:** Verschiedene Messszenarien mit entsprechenden Unsicherheiten aufgrund der sequenziellen Messung.

### 3.2.2 Approximation von Tragwerksprofilen mit B-Spline-Funktionen

Eine weitere Möglichkeit zur Approximation eines Tragwerksprofils sind Freiformkurven, u. a. sogenannte Basis-Splines (B-Splines). Bei diesen handelt es sich um stückweise zusammengesetzte, polynomiale Funktionen  $p$ -ten Grades. Die Positionen, an denen die polynomialen Funktionen zusammengesetzt sind, werden als Knoten bezeichnet. Darüber hinaus werden für die Erstellung eines B-Splines sogenannte Kontrollpunkte benötigt, an die sich der B-Spline mit Hilfe von Gewichtsfunktionen (= Basis-Funktionen) annähert. Gesucht wird somit eine möglichst optimal angepasste Kurve, die in der Nähe der Kontrollpunkte verläuft und sich durch die Änderung der Kontrollpunktpositionen lokal anpassen lässt.

Da eine Spline-Kurve durch die beiden Parameter Knoten und Kontrollpunkte eindeutig festgelegt ist, lässt sich die Definition bzw. Manipulation von B-Splines immer auf die Bestimmung geeigneter Knoten und Kontrollpunkte zurückführen.

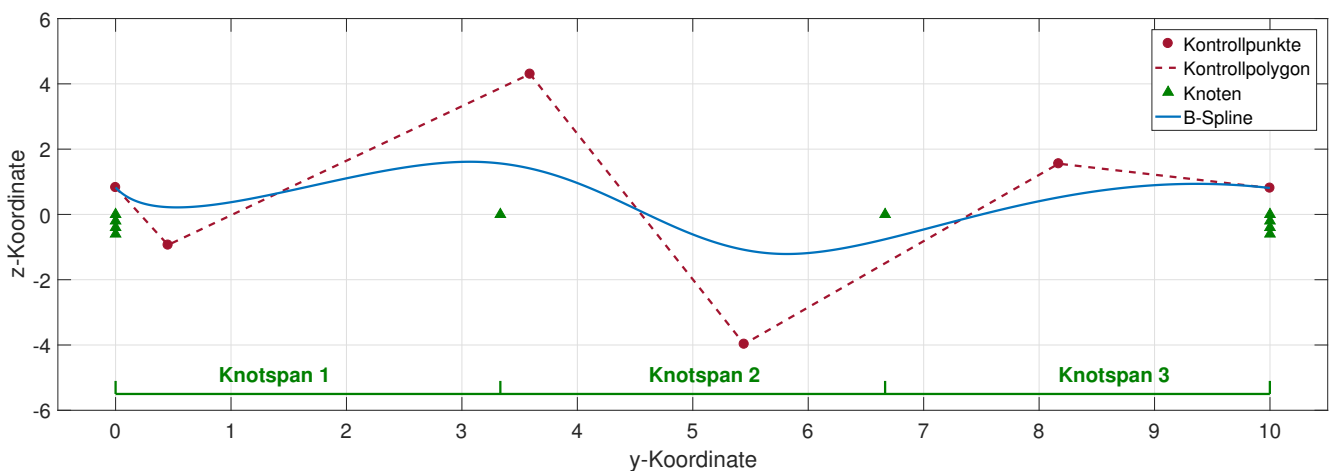
Zur Veranschaulichung der Zusammenhänge sind in **Abb. 65** ein beispielhafter B-Spline und die entsprechenden Parameter dargestellt. Darin sind die Knoten in grün abgebildet. Der Bereich zwischen zwei Knoten wird dabei als Knotspan bezeichnet. Die Kontrollpunkte sind in rot eingezeichnet und beeinflussen das lokale Verhalten der polynomialen Funktionen, siehe [SN15]. Zusammen bilden die Kontrollpunkte ein sogenanntes Kontrollpolygon (gestrichelt), was einer stückweisen linearen Approximation der Kurve entspricht. Je niedriger der Grad  $p$  der Kurve, desto besser wird sie durch das Kontrollpolygon approximiert, siehe [PT97]. Für einen B-Spline des Grades  $p = 1$  sind das Polygon und die Kurve identisch.

Die Anzahl der Knoten ( $m + 1$ ) wird über den Grad  $p$  der polynomialen Funktionen und der Anzahl der Kontrollpunkte ( $n + 1$ ) definiert:

$$m = n + p + 1, \quad (65)$$

mit:

$$\begin{aligned} m + 1 &= \text{Anzahl der Knoten,} \\ n + 1 &= \text{Anzahl der Kontrollpunkte,} \\ p &= \text{Grad der polynomialen Funktionen.} \end{aligned}$$



**Abb. 65.:** B-Spline-Funktion (blau) mit markierten Knotenpunkten (grün), Kontrollpunkten (rot) und dem Kontrollpolygon (rot gestrichelt).

Zur Approximation eines Tragwerksprofils mit einem B-Spline müssen die folgenden Parameter bekannt sein:

- der Grad der polynomialen Funktionen,
- die Anzahl der Knoten bzw. Kontrollpunkte,
- die Lage der Knoten bzw. Kontrollpunkte.

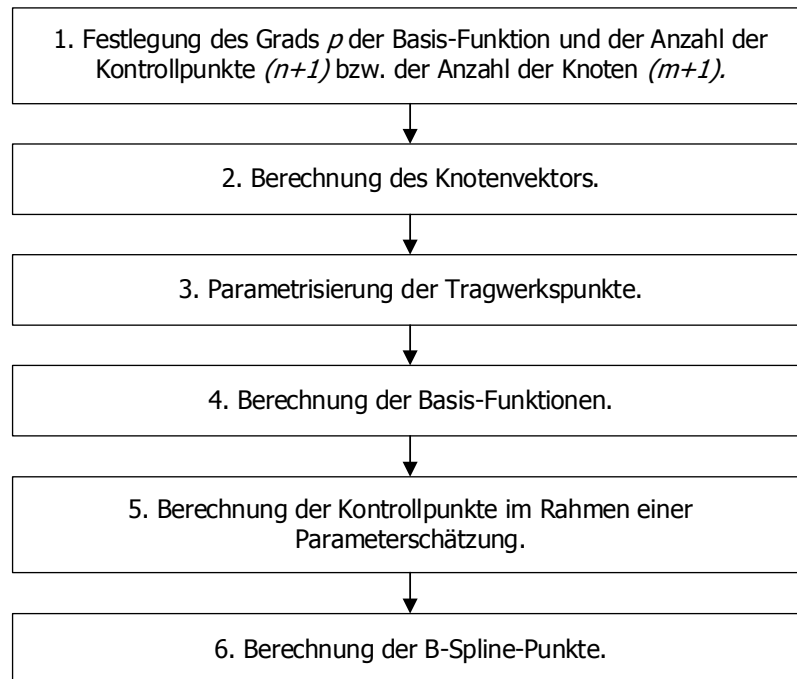
Der Grad der polynomialen Funktionen wird üblicherweise empirisch bestimmt. Ein allgemein akzeptierter Ansatz ist dabei die Verwendung von Funktionen dritten Grades, siehe [HN16].

Zusätzlich muss zur Definition eines B-Splines entsprechend **Gl. 65** entweder die Anzahl der Knoten oder die Anzahl der Kontrollpunkte vorgegeben werden, was üblicherweise ebenfalls empirisch geschieht. Da in der Regel näherungsweise Informationen über die Form des Tragwerksprofils vorliegen, wird sich diese Wahl an der Anzahl der Krümmungsänderungen orientieren, d. h. je mehr Krümmungsänderungen desto mehr Knoten bzw. Kontrollpunkte sollten gewählt werden.

Bei der sogenannten Basis-Methode wird die festgelegte Anzahl an Knoten äquidistant entlang des Tragwerkprofils verteilt, siehe auch **Abb. 65**. Durch die Vorgabe des Grades der Polynome und der Anzahl sowie der Lage der Knoten kann die Lage der Kontrollpunkte in einem linearen Gauß-Markov-Modell (GMM) auf Basis der Tragwerkspunkte bestimmt werden. Im Folgenden wird der Ablauf der Basis-Methode detailliert erläutert.

## Basis-Methode

In **Abb. 66** ist zunächst der allgemeine Ablauf der Basis-Methode dargestellt. Daran anschließend werden die einzelnen Schritte näher betrachtet.



**Abb. 66.:** Schematischer Ablauf der Basis-Methode zur Berechnung von B-Splines.

1. Zur Definition des B-Splines muss zunächst der Grad  $p$  der polynomialen Funktionen sowie die Anzahl der Kontrollpunkte  $n + 1$  bzw. die Anzahl der Knoten  $m + 1$  festgelegt werden.
2. Die Knoten werden zu einer monoton wachsenden Knotenfolge, dem sogenannten Knotenvektor  $U = \{u_0, \dots, u_m\}$ , zusammengefasst und in externe und interne Knoten unterteilt, siehe [Bur+16]. Die ersten  $p + 1$  Knoten erhalten den Wert 0 und die letzten  $p + 1$  Knoten den Wert 1; bei diesen Knoten handelt es sich um externe Knoten. Alle anderen werden als interne Knoten bezeichnet und teilen den Wertebereich zwischen 0 und 1 äquidistant auf. Somit findet eine Normierung des y-Koordinatenbereichs statt.

In **Gl. 66** ist beispielhaft der Knotenvektor für einen B-Spline 3. Grades ( $p = 3$ ) dargestellt:

$$U = \{ \underbrace{0, 0, 0, 0}_{p+1 \text{ externe Knoten}}, \quad \underbrace{\dots}_{\text{interne Knoten}}, \quad \underbrace{1, 1, 1, 1}_{p+1 \text{ externe Knoten}} \}. \quad (66)$$

Die  $p + 1$  externen Knoten am Anfang und Ende des Knotenvektors führen an diesen Stellen zu einer  $C^{-1}$ -Stetigkeit (Diskontinuität). Somit fallen die Endpunkte der B-Spline-Kurve mit den Endpunkten des Kontrollpolygons zusammen. Werden mehrfache interne Knoten an die gleiche Stelle gesetzt, was als sogenannte Multiplizität des Knotens bezeichnet wird, so können Spitzen oder Lücken der Punktwolke approximiert werden, siehe [Bur+16].

Da eine B-Spline-Kurve aus einer linearen Kombination von Basis-Funktionen zusammengesetzt wird, siehe **Gl. 69.a** bzw. **Gl. 69.b**, weist sie dieselben Stetigkeitseigenschaften wie die enthaltenen Basis-Funktionen auf. Sie ist somit im Inneren jedes Knotenspanns  $[u_i, u_{i+1})$   $(p + 1)$ -mal differenzierbar

und an den Knoten selbst höchstens  $(p - k)$ -mal differenzierbar, siehe [PT97], mit  $k$  gleich der Multiplizität des Knotens.

3. Durch die Parametrisierung werden die Messpunkte  $Q$  (y-Koordinate) auf den Wertebereich zwischen 0 und 1 normiert. Entsprechend [Lee89] und [SN15] ist dabei die Centripetal Methode zu bevorzugen. Diese basiert auf dem Konzept, dass die Zentripetalkraft proportional zur Krümmungsänderung sein soll, siehe [Lee89]. Die parametrisierten Werte lassen sich dabei wie folgt berechnen:

$$obs_{par,k} = obs_{par,k-1} + \frac{\sqrt[4]{(Q_{x,k} - Q_{x,k-1})^2 + (Q_{y,k} - Q_{y,k-1})^2}}{d}, \quad (67.a)$$

mit:

$$\begin{aligned} obs_{par,1} &= 0, \\ s &= \text{Anzahl der Punkte}, \\ k &= 2 \dots s, \\ d &= \sum_{k=1}^s \sqrt[4]{(Q_{x,k} - Q_{x,k-1})^2 + (Q_{y,k} - Q_{y,k-1})^2}. \end{aligned} \quad (67.b)$$

4. Die Berechnung der Basis-Funktionen erfolgt mithilfe der rekursiven Gleichung nach [De 01]:

$$N_{i,0}(obs_{par}) = \begin{cases} 1, & u_i \leq obs_{par} < u_{i+1} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}, \quad (67.c)$$

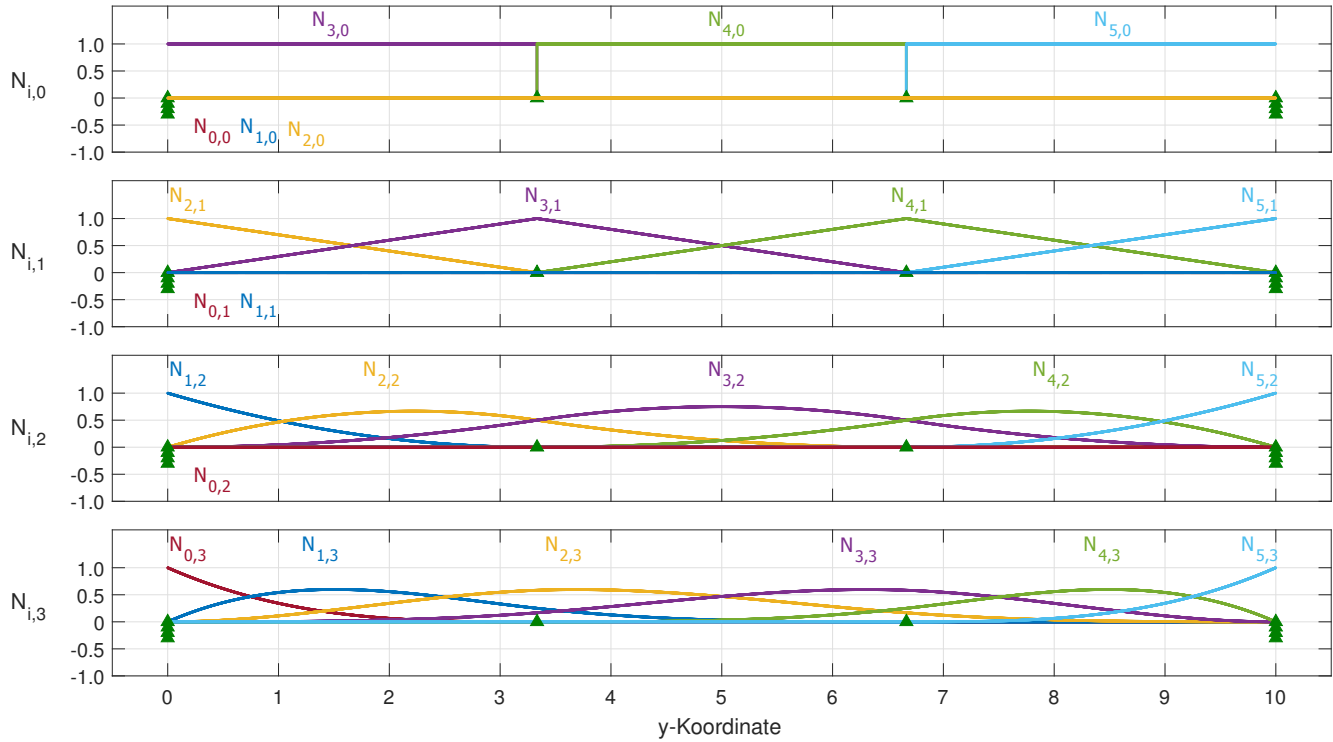
$$N_{i,p}(obs_{par}) = \frac{obs_{par} - u_i}{u_{i+p} - u_i} \cdot N_{i,p-1}(obs_{par}) + \frac{u_{i+p+1} - obs_{par}}{u_{i+p+1} - u_{i+1}} \cdot N_{i+1,p-1}(obs_{par}), \quad (67.d)$$

mit:

$$\begin{aligned} i &= \{0, \dots, n\}, \\ n + 1 &= \text{Anzahl der Basis-Funktionen bzw. Anzahl der Kontrollpunkte}, \\ obs_{par} &= \text{parametrisierte Beobachtungen}, \\ U &= \{u_0, \dots, u_m\} = \text{Knotenvektor}, \\ m &= n + p + 1, \\ p &= \text{Grad der Basis-Funktion}. \end{aligned}$$

In **Abb. 68** sind die Basis-Funktionen der einzelnen Iterationsstufen dargestellt. In der ersten Zeile sind die Basis-Funktionen für  $p = 0$  gezeigt, die mit der **Gl. 67.c** berechnet wurden. Dabei entspricht  $N_{i,0}(obs_{par})$  einer Treppenfunktion, die nur im halb offenen Intervall  $u \in [u_i, u_{i+1})$  (Knotspan) ungleich null ist.

In den weiteren Zeilen sind die Basis-Funktionen für  $p > 0$  aufgetragen. Dabei ist  $N_{i,p}(obs_{par})$  jeweils eine lineare Kombination aus zwei Basis-Funktionen des Grades  $p - 1$ .



**Abb. 68.:** Iterative Berechnung der Basis-Funktionen.

5. Die Bestimmung der Positionen der Kontrollpunkte erfolgt im Rahmen einer Parameterschätzung im linearen Gauß-Markov-Modell (GMM).

Für die Aufstellung des stochastischen Modells wird die Annahme getroffen, dass die Beobachtungen unkorreliert und mit gleichen Varianzen vorliegen, siehe [SN15]. Somit entspricht die Gewichtsmatrix einer Einheitsmatrix, die infolge der weiteren Iterationen entsprechend der berechneten Standardabweichungen der ursprünglichen Beobachtungen neu gewichtet wird.

Die Jacobi-Matrix des funktionalen Modells besteht aus den im Schritt 4 berechneten Basis-Funktionen:

$$A_{[s,(n+1)]} = \begin{pmatrix} N_{0,p}(ops_{par,1}) & \dots & N_{n,p}(ops_{par,1}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ N_{0,p}(ops_{par,s}) & \dots & N_{n,p}(ops_{par,s}) \end{pmatrix}. \quad (68.a)$$

Die Parameterschätzung erfolgt getrennt für die y- bzw. z-Koordinaten der Kontrollpunkte. Als Näherungsvektor der unbekannten Parameter  $X^0$  wird dabei ein Nullvektor eingesetzt.

Der Beobachtungsvektor  $L$  entspricht den y- bzw. z-Koordinaten der Messpunkte  $Q$ . Die Bestimmung des Lösungsvektors folgt aus:

$$d\hat{x} = (A^T P A)^{-1} (A^T P l), \quad \text{mit } l = L - A \cdot X^0. \quad (68.b)$$

6. Anschließend werden mit den ausgeglichenen Koordinaten der Kontrollpunkte sowie den berechneten Basis-Funktionen nach der Gl. 69.a bzw. Gl. 69.b die B-Spline-Punkte als lineare Kombination der beiden Größen berechnet, siehe [Bur+16]:

$$C_X(obs_{par}) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(obs_{par}) \cdot CP_{X,i}, \quad (69.a)$$

$$C_Y(obs_{par}) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(obs_{par}) \cdot CP_{Y,i}. \quad (69.b)$$

Darauf aufbauend können die ausgeglichenen Koordinaten der Tragwerkspunkte berechnet werden, die im Sinne eines B-Splines ein approximiertes Tragwerksprofil bilden.

Aufgrund der empirischen Festlegung der Knotenanzahl und ihrer äquidistanten Verteilung, die keinen Bezug zur tatsächlichen Oberflächenstruktur besitzt, ist die Güte der Approximation im Falle lokaler Unstetigkeiten durch diesen Ansatz eingeschränkt. Eine optimale Anpassung an Messprofile, wie sie in Abschnitt 3.1 gezeigt werden, kann nicht gelingen. Darüber hinaus ist die Wahl einer sinnvollen Anzahl an Knoten ohne Vorinformation schwierig zu treffen. Eine zu geringe Knotenanzahl liefert lediglich eine grobe Approximation der Tragwerksoberfläche, während zu viele Knoten zu einer Modellierung des Messrauschens führen.

Zur Optimierung der Approximation werden von [SN15] zwei aufeinander aufbauende Erweiterungen der Basis-Methode vorgeschlagen, die sich jeweils mit der Optimierung der Knotenpositionen beschäftigen:

1. Die erste Erweiterung (lineare Methode) besteht darin, die Residuen aus der Approximation, d. h. die quadrierten Abweichungen zwischen ursprünglichen und ausgeglichenen Koordinaten der Tragwerkspunkte zu nutzen. Dieser iterative Ansatz startet mit Knoten an den Rändern des zu approximierenden Tragwerkprofils (Bernsteinpolynom) und fügt schrittweise interne Knoten ein. Die Lage der Knoten wird dabei jeweils aus dem Schnittpunkt der von beiden Rändern kumulierten Verbesserungen bestimmt.
2. Für die zweite Erweiterung (nichtlineare Methode) wird zusätzlich zum GMM zur Bestimmung der Lage der Kontrollpunkte, ein nichtlineares GMM zur Bestimmung der unbekannten Knotenlagen eingeführt, das entsprechend gute Näherungswerte benötigt. Als Näherungswerte für die unbekannten Knotenlagen können die Ergebnisse der ersten Erweiterung verwendet werden. Die Elemente der Jacobi-Matrix in diesem GMM werden durch symbolisches Ableiten der Beobachtungsgleichungen nach den gesuchten Knotenlagen erhalten. Aus numerischen Stabilitätsgründen müssen die unbekannten Knoten schrittweise in das GMM eingeführt werden.

Ein weiterer Ansatz zur Bestimmung der Knotenpositionen wird in [BAN16] vorgestellt. Der Knotenvektor wird dabei basierend auf einer Monte-Carlo Simulation mit einer a priori festgelegten Anzahl an Iterationen (Zufallsexperimenten) berechnet. Die Berücksichtigung der Punktverteilung sowie von Krümmungsänderungen der aufgenommenen Punktwolke liefert eine robuste Bestimmung der Knotenpositionen, sodass keine oszillierenden Effekte an den Kanten und Lücken der Punktwolke entstehen. Bei der vorgestellten Methode werden allerdings ausschließlich die Knotenpositionen bestimmt. Auf die Berechnung der Knoten- bzw. Kontrollpunktanzahl wird dabei nicht eingegangen.

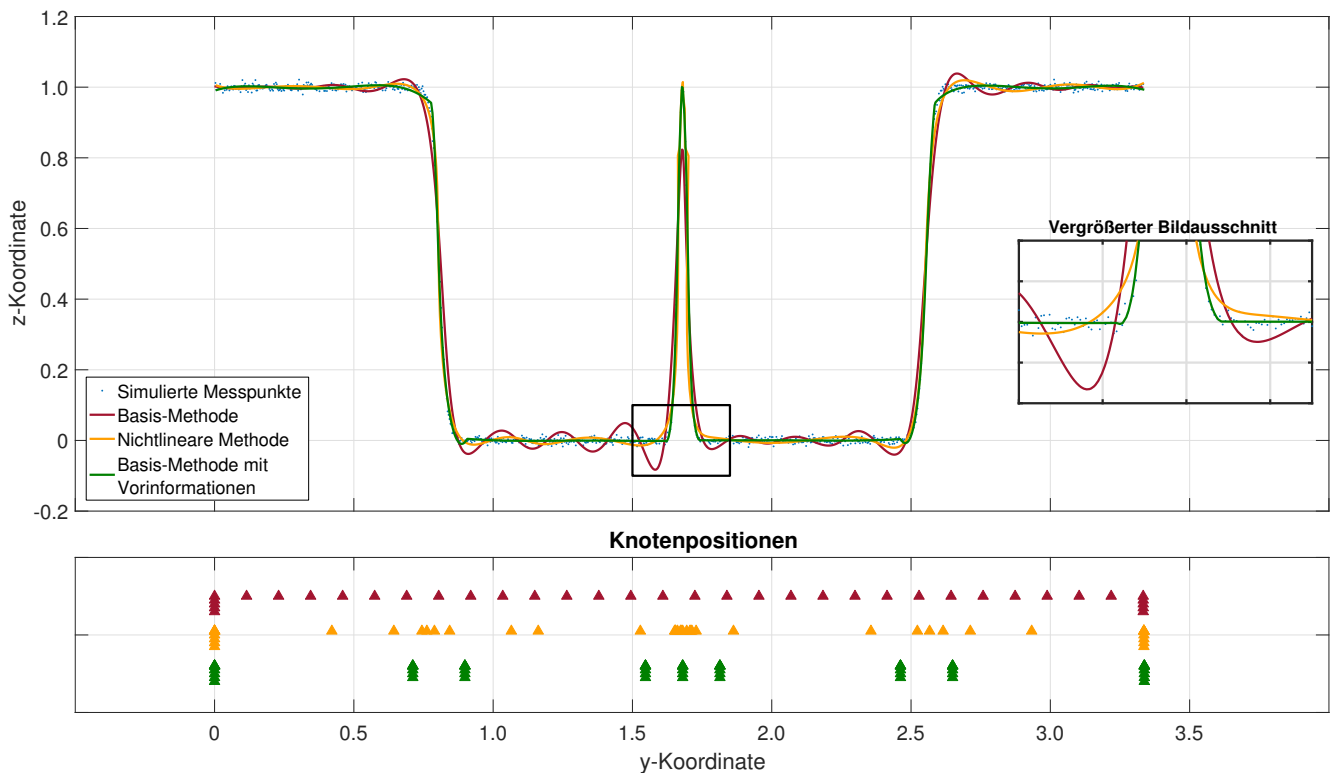
Alternativ zur Bestimmung der Knotenpositionen werden in [HN16] Methoden zur Bestimmung der idealen Anzahl an Kontrollpunkten untersucht.

Für Messprofile, die komplexe Strukturen beinhalten, reicht die Basis-Methode zur Approximation nicht aus. Um eine optimale Approximation des Messprofils zu erreichen, muss daher die steigende Komplexität der Problemstellung durch diese Erweiterungen in Kauf genommen werden.



Da sich die Knotenpositionen insbesondere an den Unstetigkeitsstellen des zu approximierenden Tragwerksprofils konzentrieren, können Vorinformationen mithilfe der in Abschnitt 3.1 beschriebenen waveletbasierten Analyse des Messprofils gewonnen werden.

**Abb. 70** zeigt einen beispielhaften Vergleich der Verwendung der Basis-Methode mit und ohne Vorinformationen und der nichtlinearen Methode aus [SN15]. Im oberen Diagramm sind die simulierten Messpunkte in blau zusammen mit den Ergebnissen der Basis-Methode in rot, der nichtlinearen Methode in gelb und der Basis-Methode mit Vorinformationen in grün dargestellt. Im unteren Diagramm sind die ermittelten Knotenpositionen der einzelnen Methoden in der entsprechenden Farbe aufgetragen.



**Abb. 70.:** Approximation eines synthetischen Messprofils mit B-Splines.

Die unterschiedliche Approximationsgüte der einzelnen Methoden zeigt sich insbesondere in dem vergrößerten Bildausschnitt auf der rechten Seite. Während die Basis-Methode aufgrund der äquidistanten Festlegung der Knotenpositionen, und damit dem fehlenden Bezug zur Tragwerksoberfläche insbesondere im Bereich der Unstetigkeitsstellen eine schlechte Approximation der Messpunkte aufweist, liefern die beiden anderen Methoden deutlich bessere Ergebnisse. Die Ähnlichkeit der Ergebnisse dieser beiden Methoden zeigt sich dabei auch in der teilweisen Übereinstimmung der Knotenpositionen im Bereich der Unstetigkeiten.

Durch eine Kombination der nichtlinearen Methode mit Vorinformationen aus der waveletbasierten Analyse könnte sich somit weiteres Optimierungspotenzial ergeben.

Da im Vordergrund dieser Arbeit jedoch die Approximation von Tragwerksprofilen steht, beschränken sich die folgenden Betrachtungen auf die Basis-Methode. Durch die Vorverarbeitung der Messprofile entsprechend Abschnitt 3.1 und der daraus resultierenden Reduzierung der Komplexität durch den Übergang zu einfacheren Tragwerkssegmenten bietet die Basis-Methode einen guten Kompromiss zwischen Approximationsgüte und Rechenaufwand.

### 3.2.3 Approximation von Tragwerksprofilen mit Wavelets

In Abschnitt 3.1.3.1 wurde im Schritt L2 die schwellwertbasierte Filterung der Wavelet-Koeffizienten vorgestellt. Zielstellung war dabei die Entfernung der Rauschanteile in den Wavelet-Koeffizienten, um die skalenübergreifende Verkettung von Unstetigkeiten zu erleichtern und damit auch die Anzahl an Fehlidentifizierungen zu reduzieren. Darauf aufbauend soll dieses, auch als Thresholding bezeichnete Verfahren, erweitert und damit der Übergang zum Wavelet-Denoising bzw. zur Wavelet-Approximation realisiert werden.

Die Approximation des Tragwerksprofils mit Wavelets wird durch die Analyse und Synthese im Rahmen einer Wavelet-Transformation in den folgenden drei Schritten realisiert:

1. Multiskalenanalyse mittels Wavelet-Transformation.
2. Thresholding der Wavelet-Koeffizienten (schwellwertbasierte Filterung).
3. Rekonstruktion des Tragwerkprofils mittels inverser Wavelet-Transformation (Wavelet-Synthese).

Im ersten Schritt der Multiskalenanalyse wird das Tragwerksprofil entsprechend Abschnitt 3.1.3.1 Schritt L1 zunächst in seine verschiedenen spektralen Anteile zerlegt. Da die zu analysierenden Tragwerksabschnitte glatte Funktionen sind, bilden sich deren Wavelet-Koeffizienten im niederfrequenten Skalenbereich ab, während in den Wavelet-Koeffizienten im hochfrequenten Skalenbereich die überlagerten Rauschanteile zu finden sind. Aufgrund dieser eindeutigen Separierung ist die Entfernung der Rauschanteile aus dem Tragwerksprofil durch Thresholding problemlos möglich.

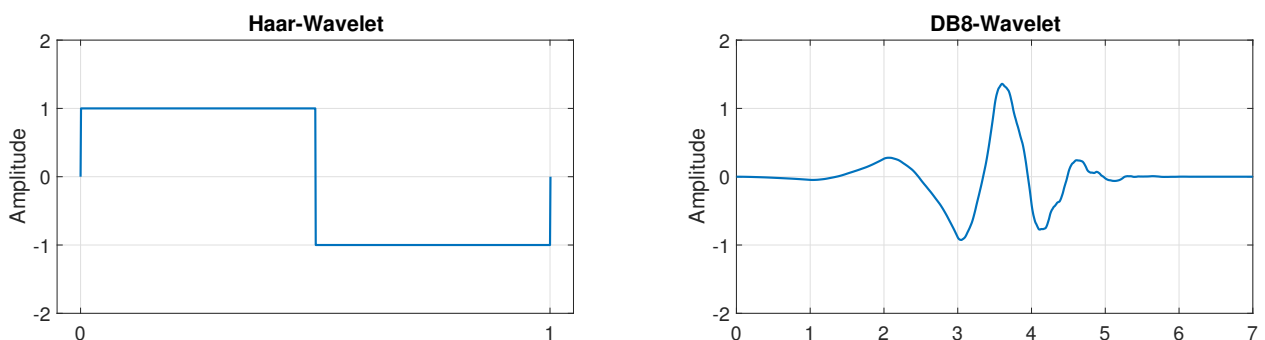
Die Rekonstruktion erfolgt im letzten Schritt durch die Wavelet-Synthese, bei der das Tragwerksprofil aus den „entrauschten“ Wavelet-Koeffizienten wiederhergestellt wird. Ermöglicht wird dies durch die Energie erhaltende Eigenschaft der Wavelet-Transformation, vergleiche auch [Heu+13, S. 392].

Somit ist das Wavelet-Denoising für eine optimale Approximation von Funktionen, die durch Rauschen überlagert werden, geeignet, siehe auch [Neu08, S. 93].

Aufbauend auf den Ausführungen aus Abschnitt 3.1.3.1 müssen für das Wavelet-Denoising somit drei Parameter festgelegt werden:

1. Das Wavelet:

Das **Wavelet** sollte so gewählt werden, dass sich die Signalanteile in den Wavelet-Koeffizienten möglichst stark von den rauschinduzierten Koeffizienten abheben, um die Trennbarkeit der beiden Anteile zu ermöglichen bzw. zu vereinfachen. Je ähnlicher das Wavelet und der Signalanteil sind, desto eher ist dies der Fall. Daher muss die Wahl des Wavelets und seiner Ordnung immer unter Berücksichtigung der Charakteristik des zu untersuchenden Tragwerksprofils erfolgen.



**Abb. 71.:** Wavelet-Funktionen des Haar-Wavelets und eines Daubechies-Wavelets der Ordnung 8.

---

In **Abb. 71** ist beispielhaft ein Daubechies-Wavelet der Ordnung 8 (DB8, siehe [Dau92]) dem Haar-Wavelet gegenübergestellt. Der Index des Wavelets gibt die Anzahl der Koeffizienten der Wavelet-Funktion an, dabei entspricht das Haar-Wavelet dem Daubechies-Wavelet DB2.

Anhand dieser beiden Wavelets können die obigen Ausführungen veranschaulicht werden: In [ST06] wird ein Wavelet für das Denoising von Elektrokardiogrammen (EKG) gesucht und über die Kreuzkorrelation das am besten passende Wavelet bestimmt. Durch den Einsatz eines mit weißem gaußschen Rauschen überlagerten, simulierten Signal kann außerdem auf die entsprechende Ordnung des Wavelets geschlossen werden, wobei die Wahl auf ein Daubechies-Wavelet der Ordnung 8 fällt, siehe **Abb. 71** rechte Seite. Diese Untersuchungen bestätigen auch die Wahl des Haar-Wavelets (siehe **Abb. 71** linke Seite) zur Aufdeckung von Unstetigkeiten in Abschnitt 3.1.

Aufgrund seiner Form kann sich das Haar-Wavelet optimal an solche Unstetigkeiten anpassen und hebt diese in den Wavelet-Koeffizienten deutlich hervor, wodurch die Trennbarkeit von Unstetigkeiten und Rauschen verbessert wird, vergleiche auch [Heu+13, S. 401]

## 2. Die Zerlegungstiefe:

Die Wahl der **Zerlegungstiefe** beeinflusst hauptsächlich die Glättung der Approximation des Tragwerksprofils. Da bei größeren Zerlegungstiefen das Thresholding der Wavelet-Koeffizienten auf mehr Skalen durchgeführt wird, können so auch mehr Wavelet-Koeffizienten im niedrigen Frequenzbereich gefiltert werden. Die Zerlegungstiefe kann prinzipiell frei gewählt und die Entscheidung beispielsweise anhand der Rauschcharakteristik der jeweiligen Skalen getroffen werden.

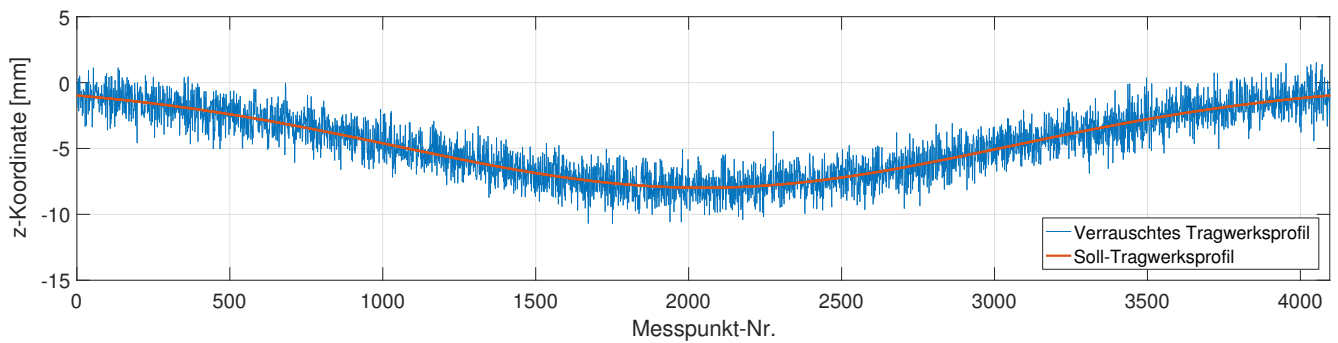
Darüber hinaus gibt es zur Bestimmung der optimalen Zerlegungstiefe auch unterschiedliche (objektive) Ansätze, wobei diese teilweise auf bestimmte Signalarten ausgelegt sind, wie z. B. EKG. Ein möglicher Ansatz für eine signalunabhängige Bestimmung der optimalen Zerlegungstiefe ist z. B. der Einsatz von Steins Unbiased Risk Estimate (SURE) entsprechend den Untersuchungen in [YA17].

## 3. Die Thresholding Methode:

Prinzipiell stehen die in Abschnitt 3.1.3.1 Schritt L2 vorgestellten Möglichkeiten des Hard- und Soft-Thresholding, sowie weitere Thresholding Ansätze zur Auswahl, siehe [PW00]. Da im Rahmen der räumlichen Prozessierung lediglich glatte Tragwerksprofile approximiert werden und somit keine Unstetigkeiten mehr vorhanden sind, kann jedoch auf eine weitergehende Betrachtung verzichtet werden.

In diesem Fall liefert **Soft-Thresholding** die besten Ergebnisse. Durch die Reduktion der Wavelet-Koeffizienten, die über dem Schwellwert liegen, entstehen weniger Artefakte in den Ergebnissen und somit eine glattere Approximation.

Basierend auf diesen Ausführungen soll im Folgenden die optimale Wahl der Zerlegungstiefe und des Wavelets anhand eines synthetischen Beispiels veranschaulicht werden. Da die Thresholding Methode nicht variiert wird, konzentriert sich die folgende Untersuchung auf die Zerlegungstiefe und die Wahl der Wavelet-Ordnung. Dazu wird eine maximale Zerlegungstiefe von 10 und Daubechies-Wavelets der Ordnung 2 bis 10 verwendet. In **Abb. 73** ist ein simuliertes Tragwerksprofil in rot dargestellt, das mit gaußschem weißem Rauschen der Standardabweichung 1 mm überlagert wurde (in blau).



**Abb. 73.:** Simuliertes Tragwerksprofil mit überlagertem gaußschen weißen Rauschen.

Insgesamt werden aus dem simulierten Tragwerksprofil 1000 verrauschte Tragwerksprofile erzeugt, die jeweils mit allen Kombinationen aus Zerlegungstiefe und Wavelet-Ordnung entrauscht werden. Als Qualitätskriterium für das Wavelet-Denoising wird die in **Tab. 73** dargestellte Residuenquadratsumme zwischen dem unverrauschten Tragwerksprofil und den Ergebnissen der Entrauschung verwendet.

		Zerlegungstiefe								
		2	3	4	5	6	7	8	9	10
Wavelet-Ordnung	DB2	703,1	343,7	170,7	85,1	42,4	21,3	12,0	20,4	51,6
	DB4	820,6	409,8	204,8	102,2	51,0	25,5	13,0	<b>7,9</b>	11,9
	DB6	865,9	433,2	216,5	108,0	53,9	26,9	13,7	8,3	11,6
	DB8	889,9	445,3	222,6	111,0	55,4	27,6	14,1	8,5	9,0
	DB10	905,0	452,9	226,4	112,9	56,3	28,1	14,3	8,6	8,9

**Tab. 73.:** Residuenquadratsumme für unterschiedliche Kombinationen aus Zerlegungstiefe und Wavelet-Ordnung.

Für dieses Beispiel wäre die optimale Kombination eine Zerlegungstiefe von 9 und ein Daubechies-Wavelet der Ordnung 4. Insgesamt zeigt sich, dass in diesem Beispiel die Wahl der Zerlegungstiefe eine deutlich größere Auswirkung auf die Güte der Approximation hat als die Wahl der Wavelet-Ordnung.

In der Praxis liegt jedoch üblicherweise kein Referenz-Tragwerksprofil vor, sodass eine direkte Abschätzung der Approximationsgüte mit unterschiedlichen Kombinationen aus Wavelet und Zerlegungstiefe nicht möglich ist. Die Simulation eines an die Anforderungen angepassten synthetischen Beispiels bietet somit eine gute Möglichkeit, um eine objektivere Entscheidung treffen zu können. Prinzipiell gilt, dass je ähnlicher das Wavelet und der Signalanteil sind, desto besser kann die Trennung zwischen Signal- und Rauschanteil gelingen.

In der Literatur finden sich viele Untersuchungen zur optimalen Wahl des Wavelets für bestimmte Signaltypen, siehe z. B. [TLS10], [DMK17], [Qiu+06] und [MAA01]. Auch für die optimale Wahl der Zerlegungstiefe bieten sich entsprechende Ansätze an, siehe u. a. [JAS12], [Sun+08] und [YA17].

Inwieweit jedoch die oft auf spezielle Signalformen ausgelegten Untersuchungen übertragbar sind, muss im Einzelfall geprüft werden. Aufbauend auf solchen Untersuchungen kann eine Vorauswahl getroffen werden, die jedoch einer Verifizierung mit entsprechenden Datensätzen bedarf.

---

### 3.2.4 Zusammenfassung und Vergleich der Approximationsmethoden

---

Durch die räumliche Prozessierung auf Basis der abgeleiteten Tragwerksprofile werden die relevanten Größen für die Tragwerksüberwachung in einzelnen Tragwerkspunkten approximiert. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, zumindest näherungsweise Unsicherheiten für die approximierten Tragwerkspunkte zu bestimmen. Aufgrund der bis dato nur räumlichen Betrachtung der Profilsclannermessungen muss auch die Unsicherheitsbestimmung dementsprechend auf Basis der räumlich verteilten Messpunkte erfolgen.

Die drei vorgestellten Methoden eignen sich je nach Oberflächenstruktur des Tragwerksprofils unterschiedlich gut für die Approximation. Dies hängt mit den Anforderungen (wie z. B. Punktzahl, Ausdehnung, usw.) zusammen, die jeweils an das zugrunde liegende Tragwerksprofil gestellt werden. Darüber hinaus ist auch die Zielstellung der Auswertung mit entscheidend für die Wahl der richtigen Prozessierungsmethode. Im Folgenden sollen daher die Eigenschaften der drei Methoden zusammengefasst werden.

#### **Räumliche Klassenbildung:**

Die räumliche Klassenbildung kann aufgrund des geringsten rechentechnischen Aufwandes sehr flexibel eingesetzt werden und benötigt zur Berechnung lediglich eine geringe Punktzahl. Die Approximation erfolgt lokal durch einzelne getrennt verarbeitete Klassen, wodurch sich der Berechnungsaufwand linear an die Klassenanzahl anpasst. Durch die Ausdehnung der Klasse ist dabei eindeutig definiert, welche Tragwerkspunkte in die Berechnung mit eingehen. Auch die Unsicherheitsbestimmung kann entsprechend der lokalen Approximation für jede Klasse getrennt durchgeführt werden.

Durch die Wahl des Schätzers für den Klassenrepräsentanten kann die räumliche Klassenbildung darüber hinaus flexibel an verschiedene Aufgabenstellungen angepasst werden. So können für denselben Klassenbereich unterschiedliche Effekte hervorgehoben bzw. getrennt betrachtet werden, wie z. B. zufällige und systematische Effekte.

Innerhalb der räumlichen Klassen werden Kontinuität und Homogenität gefordert, nicht aber zwischen den Klassen, sodass sich auch strukturell nicht zusammenhängende Tragwerkselemente entsprechend approximieren lassen.

Die Wahl der Klassengröße definiert dabei die räumliche Auflösung und muss unter Berücksichtigung des individuellen Tragwerksverhaltens derart bestimmt werden, dass die Annahme eines quasistatischen Klassenverhaltens (siehe Seite 62) nicht verletzt wird.

#### **B-Splines:**

Im Gegensatz zum Einsatzbereich der räumlichen Klassenbildung empfiehlt sich die Approximation mit B-Splines lediglich für größere Segmente des Tragwerksprofils, da ansonsten nicht genügend Messpunkte für die Parameterschätzung vorhanden sind. Der dafür benötigte Rechenaufwand ist selbst bei der Basis-Methode deutlich höher als bei den anderen beiden Methoden. Dementsprechend kann aber auch eine bessere Approximationsgüte erreicht werden. Unter der Voraussetzung, dass problematische Unstetigkeitsstellen zuvor bereinigt werden bzw. gar nicht vorhanden sind, passt sich der B-Spline (Basis-Methode) optimal an die Tragwerksprofile an, siehe auch Abschnitt 4.4.

Meist werden für die Modellbildung bei B-Splines gleich genaue und unkorrelierte Messwerte angenommen, was bei TLS-Messungen jedoch üblicherweise nicht der Fall ist. Aktuelle Untersuchungen berücksichtigen diese Effekte durch den Einsatz einer synthetischen Varianz-Kovarianzmatrix, siehe [Kau+17]. Die Approximationsgüte eines B-Splines kann grundsätzlich nur für das gesamte Tragwerksprofil als globale Größe  $s_0$  in der Parameterschätzung bestimmt werden. Da die Unsicherheit der Messpunkte jedoch u. a. von der Messgeometrie und den Oberflächeneigenschaften abhängt, ist dieser Wert nicht repräsentativ für einzelne lokale Abschnitte.

---

### Wavelets:

Der Rechenaufwand der Approximation mittels Wavelet-Transformation ist deutlich geringer als beim Ansatz mit B-Splines. Trotz der globalen Approximation besteht die Möglichkeit die Unsicherheitsbestimmung für lokale Ausschnitte des Tragwerksprofils durchzuführen.

Die Approximationsgüte ist mit der von B-Splines vergleichbar, wobei der Ansatz aufgrund der Wahlmöglichkeit für die Analysefunktion trotzdem flexibel bleibt.

### Vergleich der Methoden:

Aufgrund ihrer ähnlichen Eigenschaften ist insbesondere der Vergleich zwischen B-Splines und der Wavelet-Approximation relevant. Laut [Neu08, S. 93] entspricht die Aufgabenstellung des Denoising der optimalen Approximation von Funktionen, die durch Rauschen überlagert werden. Diese Aussage passt gut zu den Ausführungen von [DJ94], in denen deutlich gemacht wird, dass sowohl Wavelets als auch stückweise Polynome (B-Splines) zur Approximation geeignet sind. Die Güte des approximierten Tragwerksprofils hängt dabei im Wesentlichen von der Form des Tragwerkprofils ab.

In [DJ94] wird dazu ausgeführt, dass die Approximation mit stückweisen Polynomen für die Fälle die besten Ergebnisse liefert, in denen die zu schätzende Funktion aus stückweisen Polynomen zusammengesetzt ist. Besteht die zu schätzende Funktion jedoch aus einer finiten Waveletsumme, dann werden stückweise Polynome schlechtere Ergebnisse als die Wavelet-Approximation liefern. In der Realität weisen Tragwerksprofile meist keine eindeutige Charakteristik auf, sodass beide Ansätze prinzipiell gleichwertig eingesetzt werden können.

Die Stärke dieser beiden Methoden ist die hohe Approximationsgüte, die jedoch teilweise durch einen hohen Rechenaufwand generiert werden muss. Die räumliche Klassenbildung erfordert hingegen aufgrund des simplen Modells einen relativ geringen Rechenaufwand, zeigt aber teilweise Schwächen bei der Approximationsgüte. Dies gilt insbesondere beim Einsatz in Bereichen mit wenigen Tragwerkspunkten. Die Stärke der räumlichen Klassenbildung liegt, wie in Abschnitt 4.1 gezeigt wird, vielmehr in der Approximation von stark strukturierten Tragwerksprofilen und den damit einhergehenden räumlich separierten Tragwerkselementen.

Die beiden anderen Methoden eignen sich komplementär zur räumlichen Klassenbildung eher für „glatte“ Tragwerksprofile, die eine globale Approximation ermöglichen.

Insgesamt hängt die Wahl der Approximationsmethode somit auch von der jeweiligen Charakteristik des zu untersuchenden Tragwerks ab, was in Kapitel 4 anhand ausgewählter Beispiele verdeutlicht wird.

---

### 3.3 Zeitliche Prozessierung

---

Mit der automatischen Analyse von Messprofilen (Abschnitt 3.1) und der räumlichen Prozessierung der Tragwerksprofile (Abschnitt 3.2) ist der räumliche Teil der raumzeitlichen Prozessierung von Profilschnormessungen abgeschlossen. Die so erzeugten Ergebnisse stehen für die Tragwerksüberwachung als relevante Größen profilweise zur Verfügung und werden im Folgenden als approximierte Tragwerkspunkte bezeichnet. Durch den Zeitbezug der Tragwerksprofile ergeben sich Zeitreihen, die insbesondere für die Überwachung von Tragwerken in Bewegung interessant sind. In diesen Zeitreihen sind in der Regel noch Unstetigkeiten enthalten, die ihre Ursache nicht in der Bewegung des Tragwerkes haben und deshalb lokalisiert und korrigiert bzw. eliminiert werden müssen.

Die Aufgabe der zeitlichen Prozessierung ist es, die in der Regel instationären Zeitreihen so aufzubereiten, dass sie für die Methoden der Tragwerksüberwachung verwendet werden können. Da es sich bei den zentralen Aufgaben erneut um die Lokalisierung und Charakterisierung von Unstetigkeiten in Messreihen handelt, kann die skalierte Betrachtungsweise aus Abschnitt 3.1 für die Entwicklung eines Algorithmus im Rahmen der zeitlichen Prozessierung verwendet werden.

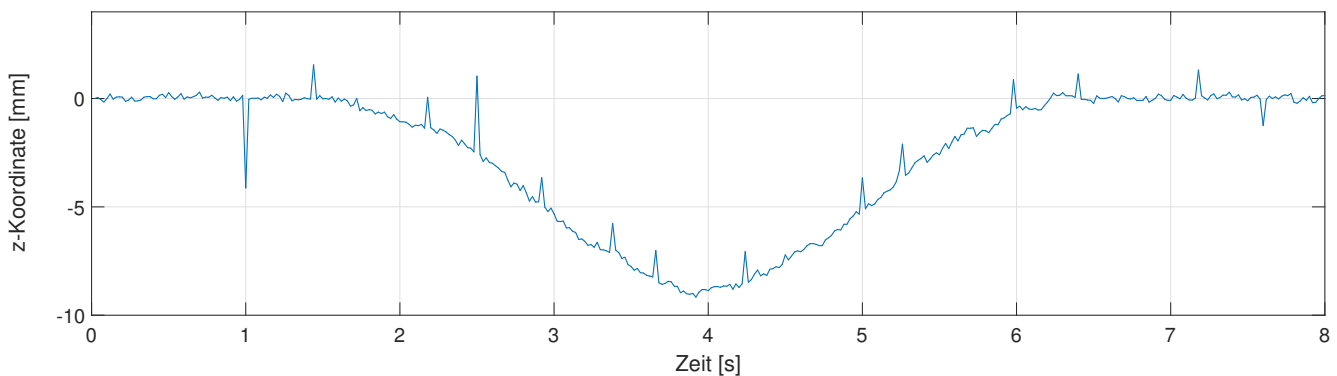
Bevor in Abschnitt 3.3.2 auf die Realisierung des Analysealgorithmus eingegangen wird, sollen im nächsten Abschnitt zunächst die Anforderungen an den Einsatz bei Zeitreihen definiert werden. Abschließend wird in Abschnitt 3.3.3 der Einsatz der vorgestellten Methoden detailliert betrachtet.

---

#### 3.3.1 Anforderungen an den Analysealgorithmus für den Einsatz bei Zeitreihen

---

In **Abb. 76** ist eine typische Zeitreihe der z-Koordinate eines approximierten Tragwerkspunktes dargestellt. Bei einem Profilabstand von 20 ms (Messfrequenz 50 Hz) ergibt sich diese charakteristische 8-sekündige Zeitreihe einer Zugüberfahrt. Die Hauptinformation steckt dabei im niederfrequenten Verformungsanteil, der ungefähr zum Zeitpunkt 4 Sekunden sein Minimum erreicht. Zusätzlich zu dieser maximalen Deformation treten isolierte hochfrequente Unstetigkeiten auf.



**Abb. 76.:** Zeitreihe der z-Koordinate eines approximierten Tragwerkspunktes während einer 8 Sekunden andauernden Zugüberfahrt.

Bei diesen Unstetigkeiten handelt es sich nach der Definition aus Abschnitt 3.1.2 um Spitzen, d. h. abrupte Niveauänderungen mit Rückkehr auf das Ausgangsniveau. Diese unterscheiden sich von Spitzen im Ortsbereich hauptsächlich aufgrund ihrer geringeren (in diesem Fall zeitlichen) Ausdehnung und bestehen typischerweise nur aus einem Messwert.

Unstetigkeiten des Typs Sprung treten dagegen nicht auf. Damit ändern sich die Anforderungen an den Analysealgorithmus dahin gehend, dass in der Lokalisierungsphase lediglich Spitzen erkannt werden müssen und die anschließende Charakterisierungsphase entsprechend den Ausführungen in Abschnitt 3.1.3.2



---

hauptsächlich dazu dient, Fehlerkennungen von realen Unstetigkeiten zu trennen.

Im Gegensatz zur Lokalisierung im Rahmen der räumlichen Prozessierung muss aufgrund der geringen Ausdehnung der Unstetigkeiten die Lokalisierung punktgenau erfolgen. Falls dies nicht realisiert werden kann, ist die Nutzung des Analysealgorithmus unzweckmäßig, da bereits die Fehllokalisierung um einen Messwert dazu führt, dass ein korrekter Tragwerkspunkt verfälscht wird und der verfälschte Tragwerkspunkt beibehalten wird. Die punktgenaue Lokalisierung ist somit ein weiterer Aspekt bei der Anwendung des Analysealgorithmus für die zeitliche Prozessierung und hat oberste Priorität.

Das Auftreten von Unstetigkeiten in den Zeitreihen kann prinzipiell die folgenden beiden Ursachen haben:

1. Nicht identifizierte Fehlmessungen im Tragwerksprofil,
2. Verbleibende, nicht modellierte Systematiken in den Profilsclannermessungen (speziell beim Z+F Profiler 9012: verbleibende Encoderticksprünge, siehe Abschnitt 2.2.2).

Die Motivation zur getrennten Betrachtung dieser beiden Ursachen liegt in ihrer unterschiedlichen Auswirkung auf das gesamte Tragwerksprofil. Nicht identifizierte Fehlmessungen im Ortsbereich betreffen lediglich einen kleinen Ausschnitt und verfälschen das Ergebnis somit nur lokal. Die dadurch entstehenden Unstetigkeiten müssen aus der Zeitreihe entfernt werden, wodurch zumindest ein Teil der Messinformation des entsprechenden Tragwerksprofils verloren geht.

Ein nach der Korrektur aus Abschnitt 2.2.2 verbleibender Encoderticksprung verfälscht hingegen global ein gesamtes Tragwerksprofil. Durch eine entsprechende Korrektur besteht jedoch die Möglichkeit, alle betroffenen Messwerte zu korrigieren und so die gesamte Messinformation innerhalb des Tragwerksprofils zu erhalten.

Somit besteht neben der Lokalisierung der Unstetigkeiten die zweite Anforderung an den Analysealgorithmus für die zeitliche Prozessierung darin, die Unstetigkeiten entsprechend ihrer beiden möglichen Ursachen zu differenzieren.

---

### 3.3.2 Realisierung des Analysealgorithmus zum Einsatz bei Zeitreihen

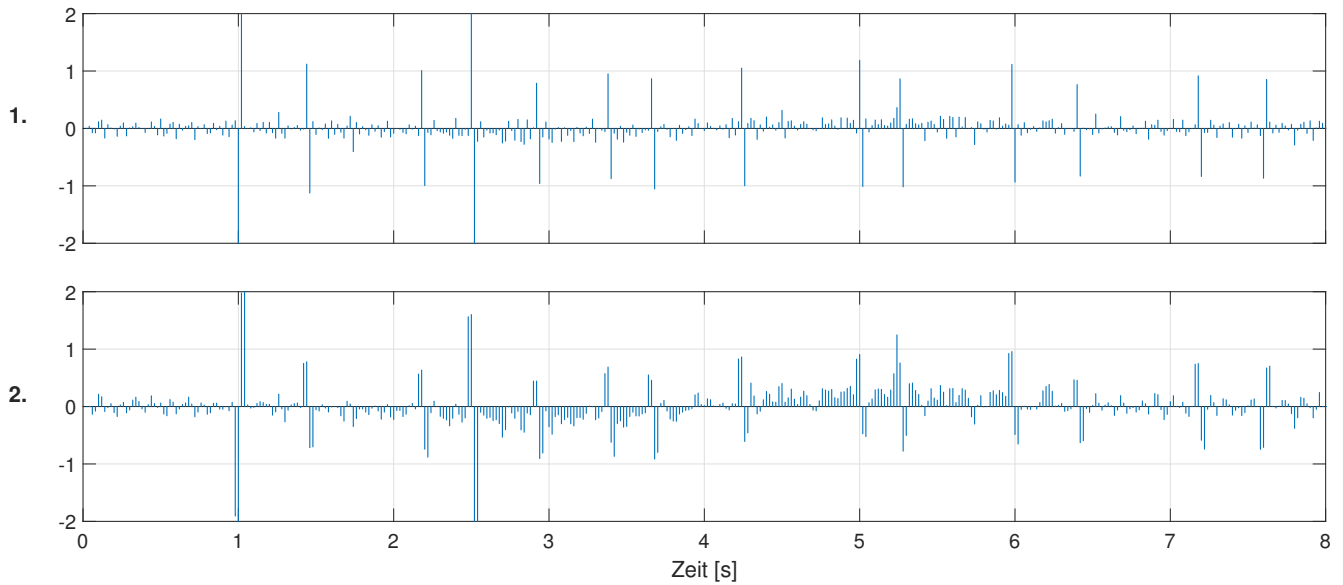
---

Die Realisierung des Analysealgorithmus für die zeitliche Prozessierung orientiert sich an der Umsetzung der automatischen Analyse der Messprofile (vergleiche Abschnitt 3.1.3, insbesondere **Abb. 38**). Aufgrund der in Abschnitt 3.3.1 definierten Anforderungen müssen bei der Realisierung entsprechende Modifikationen eingeführt werden. Zwei Modifikationen betreffen dabei die Lokalisierungsphase und eine Modifikation betrifft die Charakterisierungsphase.

Bei der **ersten** Modifikation der **Lokalisierungsphase** handelt es sich um die Reduzierung der Zerlegungstiefe der Multiskalenanalyse auf zwei Skalen. Der Einsatz eines Wavelets mit geringerer Filterlänge ermöglicht eine noch präzisere Lokalisierung der Unstetigkeiten. Damit wird sichergestellt, dass von Fehlmessungen betroffene Tragwerksprofile richtig erkannt werden.

Zur Veranschaulichung der Realisierung sind in **Abb. 78.a** die Wavelet-Koeffizienten der Multiskalenanalyse der ersten beiden Zerlegungsstufen für die Zeitreihe aus **Abb. 76** dargestellt. Aufgrund der hochfrequenten Eigenschaften der Unstetigkeiten zeigen sich diese besonders gut in der niedrigsten Zerlegungsstufe. Die 14 auftretenden Unstetigkeiten werden in diesen Wavelet-Koeffizienten maximal hervorgehoben, während die restlichen, durch Rauschen verursachten Koeffizienten deutlich niedrigere Amplituden und keine Verteilungssystematiken aufweisen.

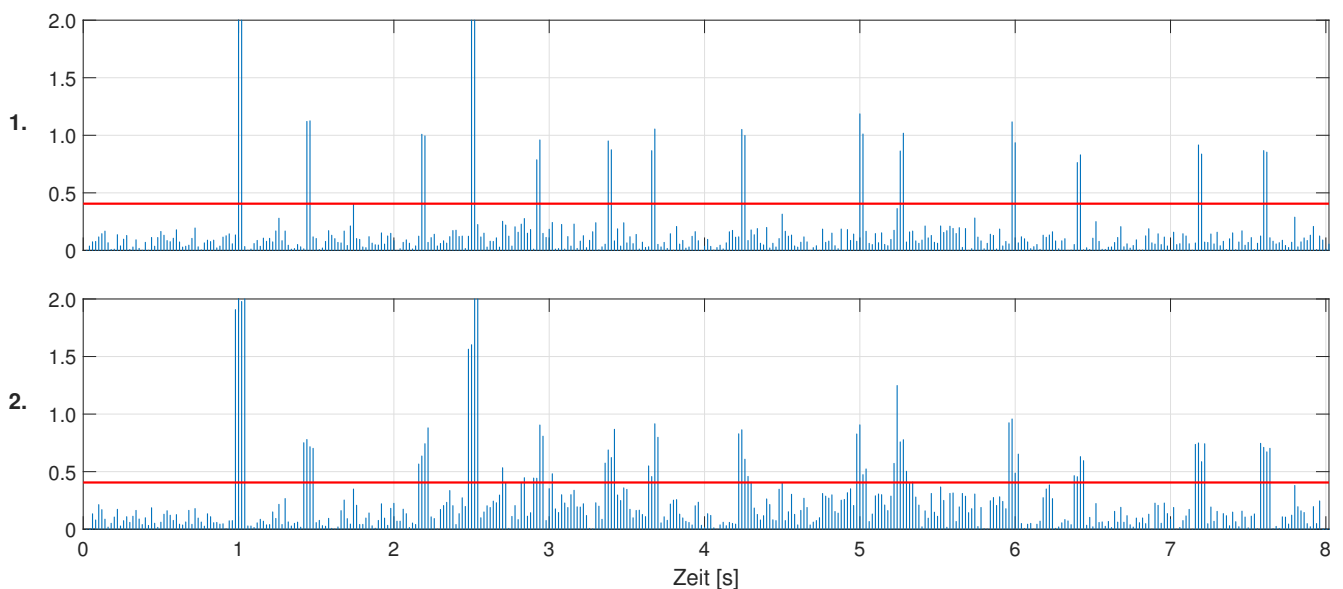
In den Wavelet-Koeffizienten der zweiten Zerlegungsstufe lassen sich erste Systematiken aufgrund der Zugüberfahrt erkennen: Im Bereich um Sekunde 3 dominieren negative Koeffizienten, im Bereich um Sekunde 5 dagegen positive. Zur Trennung von Signal- und Rauschanteilen können die Wavelet-Koeffizienten



**Abb. 78.a.:** Wavelet-Koeffizienten der ersten beiden Zerlegungsstufen.

analog zu Abschnitt 3.1.3.1 Schritt L2 schwellwertbasiert gefiltert werden. Der dazu verwendete universelle Schwellwert ist in **Abb. 78.b** rot dargestellt. Mit diesem Thresholding wird die sinnvolle Aufsummierung der Koeffizientenbeträge und damit auch die automatische Lokalisierung der Unstetigkeiten ermöglicht.

Aufgrund der Verwendung des Haar-Wavelets und der zeitlichen Ausdehnung der Unstetigkeiten von lediglich einem Messwert, induziert jede Spitze in der ersten Zerlegungsstufe exakt einen positiven und einen negativen Wavelet-Koeffizienten, siehe **Abb. 78.a**. Dementsprechend können passend zu den 14 vorhandenen Unstetigkeiten 28 Wavelet-Koeffizientenbeträge erkannt werden, die über dem bestimmten Schwellwert liegen.

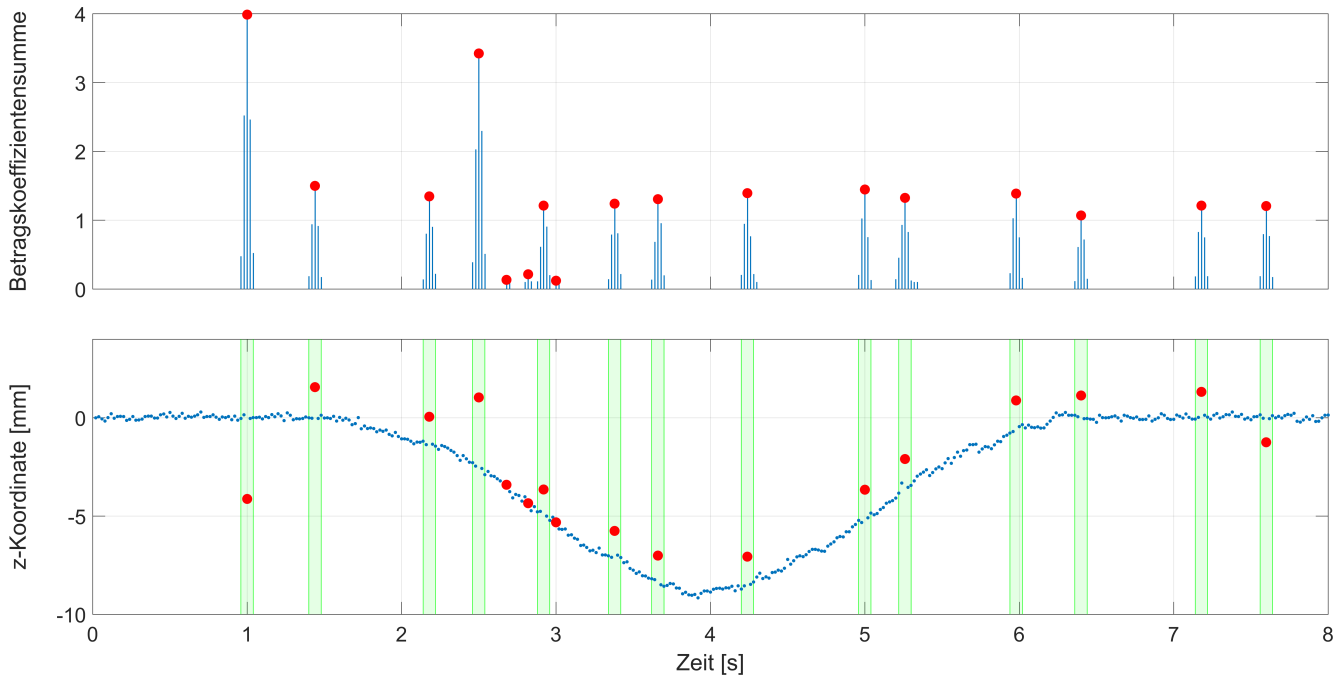


**Abb. 78.b.:** Beträge der Wavelet-Koeffizienten aus **Abb. 78.a** mit universellem Schwellwert (in rot).

In **Abb. 79** ist das Endergebnis der Lokalisierungsphase dargestellt. Darin sind die aufgedeckten lokalen Maxima sowohl in der Betragskoeffizientensumme im oberen Diagramm als auch in der Zeitreihe der z-

Koordinate des approximierten Tragwerkspunktes im unteren Diagramm markiert. In beiden Diagrammen lassen sich im Bereich um Sekunde 3 noch Rauschanteile erkennen. Diese stammen aus der zweiten Zerlegungsstufe, siehe **Abb. 78.b** in der unteren Zeile und werden, ohne die korrekte Lokalisierung der Unstetigkeiten zu beeinflussen, in der anschließenden Charakterisierungsphase identifiziert und eliminiert.

Insgesamt betrachtet kann durch die passende Wahl der Zerlegungstiefe die geforderte punktgenaue Lokalisierung gewährleistet werden.



**Abb. 79.:** oben: Betragskoeffizientensumme mit rot markierten Maxima; unten: Zeitreihe der z-Koordinate des approximierten Tragwerkspunktes mit rot markierten Unstetigkeiten.

Die **zweite Modifikation** der **Lokalisierungsphase** besteht darin, die Ergebnisse im Zeitbereich zu verifizieren. Dazu werden die Ergebnisse der Lokalisierungsphase als Vorinformationen für eine gezielte Analyse im Zeitbereich genutzt. Dies ist jedoch nur deshalb sinnvoll möglich, weil Informationen über Existenz und Position der Unstetigkeiten zumindest „grob“ vorliegen.

Die Zeitreihe wird dazu in einem Intervall (Analysefenster) um die lokalisierte Unstetigkeit mit einem Median-Filter untersucht. Da die Unstetigkeit die maximale Abweichung innerhalb des Analysefensters vom Median haben sollte, kann dadurch verifiziert werden, ob in der Lokalisierungsphase das richtige „fehlerbehaftete“ Tragwerksprofil bestimmt wurde.

Die verwendeten Analysefenster sind in **Abb. 79** im unteren Diagramm grün hinterlegt. Die Breite des Analysefensters ergibt sich als Funktion der Zerlegungstiefe und beträgt in diesem Fall vier Messwerte.

In der anschließenden **Charakterisierungsphase** werden entsprechend Abschnitt 3.1.3.2 der Typ, das Vorzeichen und die Dimension der Unstetigkeiten bestimmt, indem mit den Betragskoeffizientenverläufen eine Regressionsanalyse durchgeführt wird. Für eine erfolgreiche Schätzung dieser Parameter wird eine größere Zerlegungstiefe als in der Lokalisierungsphase benötigt.

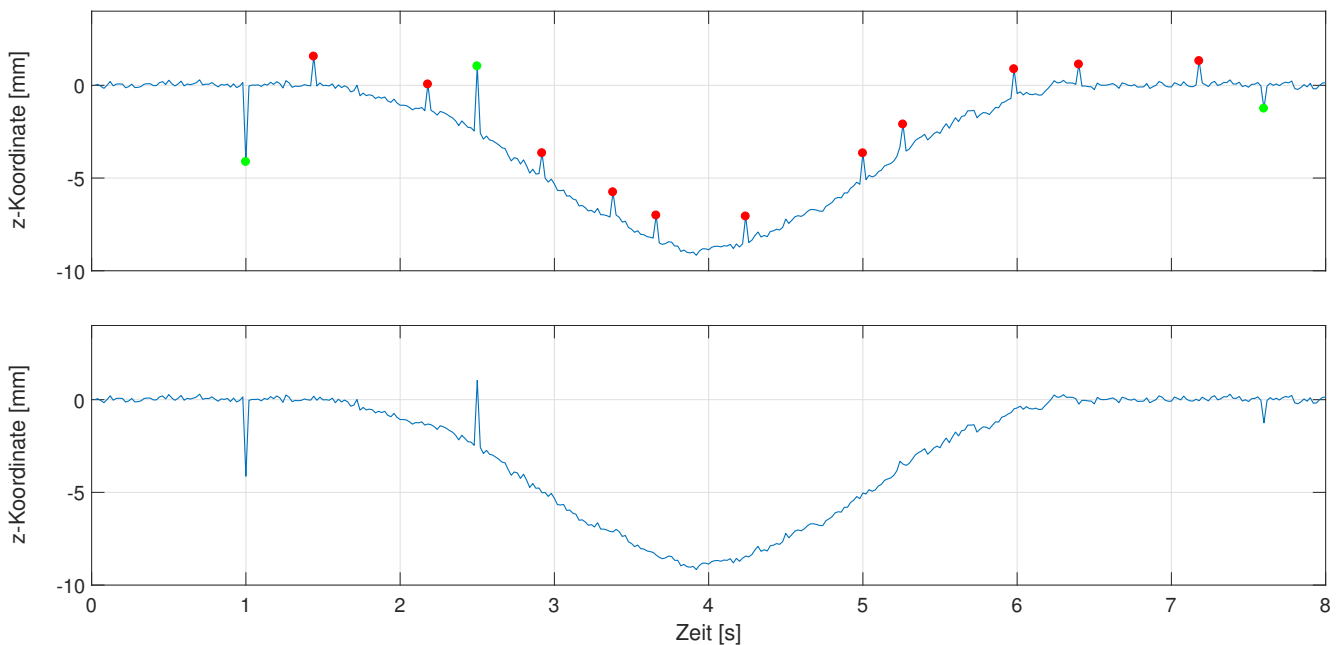
Aufbauend auf der Bestimmung der Dimension kann durch die Einführung einer weiteren **Modifikation** die Trennung von Unstetigkeiten aufgrund ihrer Ursachen durchgeführt werden. Für Encoderticksprünge lassen sich die Dimension und das Vorzeichen der entstehenden Unstetigkeiten aus der Messgeometrie bestimmen. Über den Vergleich der bestimmten Dimension mit den im Rahmen der Regressionsanalyse berechneten Werten kann die Zuordnung zur entsprechenden Ursache durchgeführt werden.

Im oberen Diagramm in **Abb. 80** ist die ursprüngliche Zeitreihe dargestellt. Darin sind elf Unstetigkeiten mit einem roten Punkt markiert, da sie vom Vorzeichen und der Dimension einer Unstetigkeit aufgrund eines Encoderticksprunges entsprechen.

Im unteren Diagramm ist die gleiche Zeitreihe nach der Korrektur der Winkelwerte dieser elf Tragwerksprofile gezeigt. Es ist erkennbar, dass an den entsprechenden Stellen keine Unstetigkeiten mehr auftreten und die komplette Messinformation dieser Tragwerksprofile erhalten werden konnte.

Die übrigen Unstetigkeiten sind im oberen Diagramm in **Abb. 80** grün markiert und weichen von der berechneten Größenordnung bzw. dem Vorzeichen für eine Unstetigkeit aufgrund eines Encoderticksprunges ab. Da es sich bei diesen um Unstetigkeiten aufgrund einer anderen Ursache handelt, müssen diese separat behandelt werden.

Um nicht die gesamte Messinformation in diesen Profilen eliminieren zu müssen, besteht die Möglichkeit, die den approximierten Tragwerkspunkten zugrunde liegenden Tragwerksprofile, gezielt auf Fehlmessungen zu untersuchen (rekursive räumliche Prozessierung). Dadurch ist es möglich, trotz einer Fehlmessung den Großteil der Messinformation zu erhalten. Falls dies nicht gelingt, muss der approximierte Tragwerkspunkt eliminiert und durch Interpolation ersetzt werden.



**Abb. 80.:** Median-Zeitreihe vor und nach der Korrektur der Encoderticksprünge.

Für den Fall, dass Fehlmessungen zu Unstetigkeiten führen, die das gleiche Vorzeichen und die gleiche Dimension wie Unstetigkeiten aufgrund eines Encoderticksprunges aufweisen, ist die dargestellte Umsetzung anfällig für Fehlklassifizierungen. Darüber hinaus kann das kombinierte Auftreten von beiden Ursachen in einem Tragwerksprofil dazu führen, dass durch die doppelte Verfälschung des approximierten Tragwerkspunktes, der Encoderticksprung nicht erkannt wird und somit die Messinformation nur schwer zu erhalten ist.

Zur Behebung dieser Problematiken wird im nächsten Abschnitt eine Strategie entwickelt, mit der durch die Wahl des Klassenrepräsentanten in Kombination mit den gezeigten Methoden Fehlklassifizierungen vermieden bzw. die Trennung von kombiniert auftretenden Ursachen ermöglicht wird.

### 3.3.3 Einsatz zur Analyse von Zeitreihen

Im vorangegangenen Abschnitt wurden die wichtigsten Aspekte für die Anwendung des Analysealgorithmus im Zeitbereich basierend auf den dafür angepassten Anforderungen dargestellt. Grundsätzlich kann jedoch insbesondere die Trennung von Unstetigkeiten aufgrund ihrer unterschiedlichen Ursachen fehlschlagen. Um dies zu vermeiden, wird im Folgenden ein mehrstufiger Analyseprozess vorgestellt, durch den die Klassifizierung verbessert werden kann.

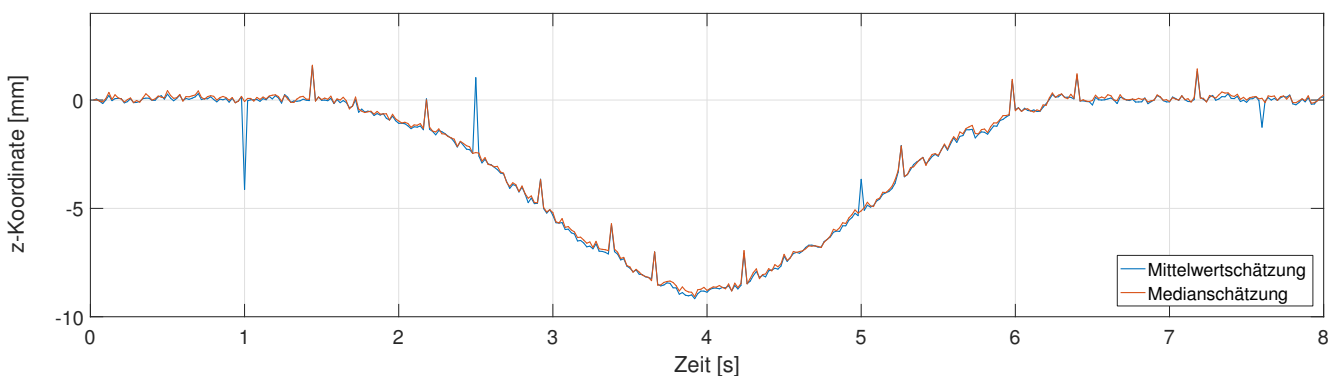
Da die Spezifizierung der Unstetigkeiten über die Ursachen ihrer Entstehung erfolgen soll, müssen zunächst diese Ursachen analysiert werden, um daraus Möglichkeiten für die Differenzierung der lokalisierten Unstetigkeiten abzuleiten. Ist die Ursache ein nicht identifizierter Encoderticksprung, so sind alle Koordinaten der Punkte eines Tragwerksprofils systematisch verfälscht. Im Gegensatz dazu treten nicht identifizierte Fehler im originären Messprofil nur vereinzelt auf, d. h. die Punkte eines Tragwerksprofils sind nur teilweise davon beeinflusst.

Alle drei räumlichen Prozessierungsmethoden eignen sich, um approximierte Tragwerkspunkte zu erzeugen. Falls sich die einzelnen Fehlerquellen bei der Approximation der Tragwerkspunkte unterschiedlich auswirken, kann auf diese Weise die angestrebte Separierung durchgeführt werden. Die Approximation mit räumlichen Klassen eignet sich insbesondere zur Trennung von Unstetigkeiten aufgrund von Encoderticksprüngen und Fehlmessungen. Bei dieser Methode besteht die Möglichkeit, unterschiedliche Schätzer für die Generierung des Klassenrepräsentanten einzusetzen:

Kommt als Schätzer das arithmetische Mittel zum Einsatz, so zeigen sich die systematischen Einflüsse unabhängig von der betroffenen Anzahl der Profilpunkte in einer verzerrten Schätzung, welche wiederum die Unstetigkeit - unabhängig von der Ursache - hervorhebt.

Wird der Klassenrepräsentant hingegen mit dem Median bestimmt, so ist diese Schätzung robust gegen einzelne Fehlmessungen im Profil, d. h. es treten für diese Profile keine verzerrten Schätzungen auf. Dabei könnte die Anzahl der Fehlmessung theoretisch bis zu 50 % betragen.

In **Abb. 81** sind die Zeitreihen dieser beiden Klassenrepräsentanten für dieselbe räumliche Klasse dargestellt. Die Zeitreihe der Mittelwertschätzung (in blau) lokalisiert alle problematischen Profile, während die Zeitreihe der Medianschätzung (in rot) nur die Profile lokalisiert, bei denen alle Koordinaten systematisch verfälscht sind.



**Abb. 81.:** Zeitreihen der Klassenrepräsentanten (arithmetisches Mittel und Median) mit Unstetigkeiten aufgrund von Encoderticksprüngen und Fehlmessungen.

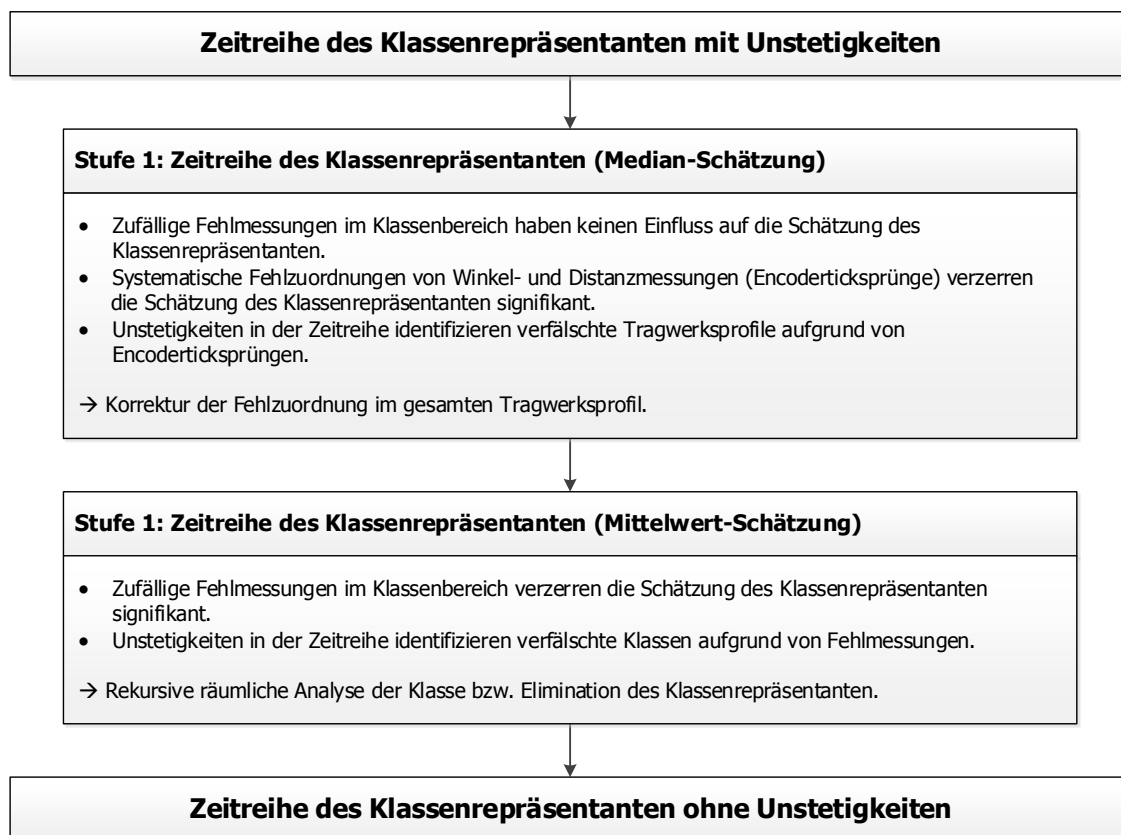
Der Vergleich mit **Abb. 80** deckt auf, dass unter den elf erkannten Unstetigkeiten aufgrund von Encoderticksprüngen eine Fehlklassifizierung vorhanden ist, und zwar zum Zeitpunkt 5 Sekunden. Da diese Unstetigkeit in **Abb. 81** lediglich in der Zeitreihe der Mittelwertschätzung vorhanden ist, zeigt sich, dass

es sich um eine Fehlmessung handelt, deren Auswirkung jedoch der Größenordnung eines Encoderticksprungs entspricht.

Um die Anforderungen an den Analysealgorithmus für den Einsatz bei Zeitreihen vollkommen zu erfüllen, wird entsprechend den beiden Schätzern eine zweistufige Umsetzung durchgeführt. Um dabei optimale Ergebnisse zu erhalten, werden zunächst die folgenden Anforderungen an die Klassenrepräsentanten gestellt:

1. Die zugrunde liegende räumliche Klasse wird über ihre Lage und Ausdehnung am Tragwerk so gewählt, dass ein dafür berechneter Klassenrepräsentant:
  - maximal von einem möglichen Encoderticksprung beeinflusst wird (siehe Berechnungsbeispiel in Abschnitt 2.2.2) und
  - eine möglichst geringe Unsicherheit hat.
2. Die Anzahl der Fehlmessungen in einer Klasse ist geringer als 50 % (gewährleistet durch die Vorverarbeitung aus Abschnitt 3.1).

Basierend auf einer so gewählten (optimalen) Klasse werden in der ersten Stufe die Encoderticksprünge in der Zeitreihe des Medians lokalisiert und korrigiert. In der zweiten Stufe werden anschließend Fehlmessungen in der neu berechneten Zeitreihe des Mittelwertes lokalisiert und eliminiert. In **Abb. 82** ist die zweistufige Umsetzung in schematischer Form zusammengefasst.



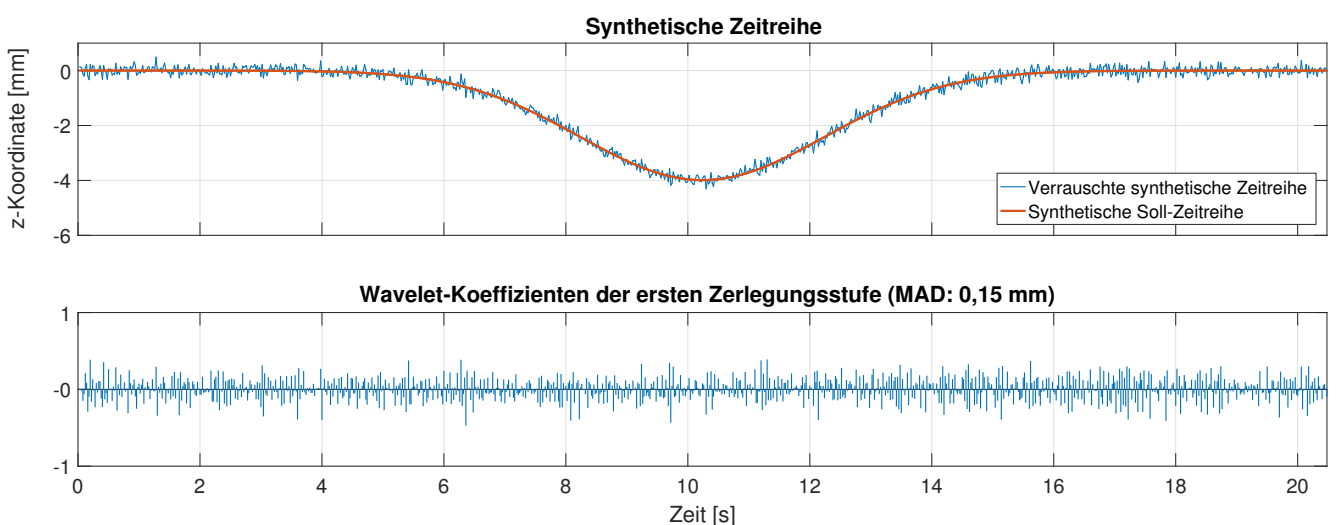
**Abb. 82.:** Zeitliche Prozessierung von Profilsclannermessungen.

### 3.3.4 Unsicherheitsbestimmung in Zeitreihen von approximierten Tragwerkspunkten

Basierend auf der raumzeitlichen Prozessierung, durch die Zeitreihen von approximierten Tragwerkspunkten entstehen, soll im Folgenden die Angabe des Messergebnisses um eine entsprechende Unsicherheit ergänzt werden. Bei der vorangegangenen zeitlichen Prozessierung konnten systematische Effekte und grobe Fehlmessungen durch die gezeigten Methoden eliminiert werden, sodass bereinigte Zeitreihen zur Verfügung stehen. Diese Zeitreihen enthalten die nach der Approximation der Tragwerksoberfläche verbliebenen stochastischen Einflüsse sowie etwaige deterministische Anteile aufgrund der Belastung des Tragwerks.

Bei der Unsicherheitsbestimmung für diese Zeitreihen müssen zwei Fälle unterschieden werden:

1. Bei sich hinreichend in Ruhe befindlichen Tragwerksoberflächen ist die Zeitreihe der approximierten Tragwerkspunkte stationär. Über die Berechnung der Standardabweichung der Zeitreihe kann eine einfache Unsicherheitsschätzung im Zeitbereich erfolgen. Dies gilt z. B. für Eisenbahnbrücken, die außer bei einer Zugüberfahrt keiner externen Last ausgesetzt sind. Diese Ausschnitte der Zeitreihe können als repräsentativ für die gesamte Zeitreihe angenommen werden.
2. Tragwerksoberflächen, die deterministischen oder stochastischen Belastungen ausgesetzt sind, führen Bewegungen mit unterschiedlichen Amplituden aus, die zu instationären Zeitreihen führen. Für solche Zeitreihen kann die Unsicherheitsschätzung nicht mehr im Zeitbereich erfolgen. Stattdessen muss die Bewegung der Tragwerkoberfläche identifiziert und von den zufälligen Abweichungen separiert werden. Dies gelingt durch die Wavelet-Transformation der Zeitreihe, die eine nach Frequenzbereichen skalierte Betrachtung ermöglicht. Mit dem Ergebnis der Multiskalenanalyse liegt die gewünschte Separierung von zufälligen Abweichungen und Bewegungen der Tragwerksoberfläche vor. Aufgrund der in Abschnitt 3.1.3.1 vorgestellten Eigenschaften und unter der Annahme, dass gaußsches weißes Rauschen vorliegt, eignet sich die erste Zerlegungsstufe in der Praxis laut [DJ94] zur Bestimmung der Unsicherheit. Im Sinne des Parsevalschen Theorems kann daraus eine Schätzung für die Standardabweichung der Zeitreihe erhalten werden. Diese wird mit der in Abschnitt 3.1.3.1 angegebenen **Gl. 44.b** als MAD berechnet.



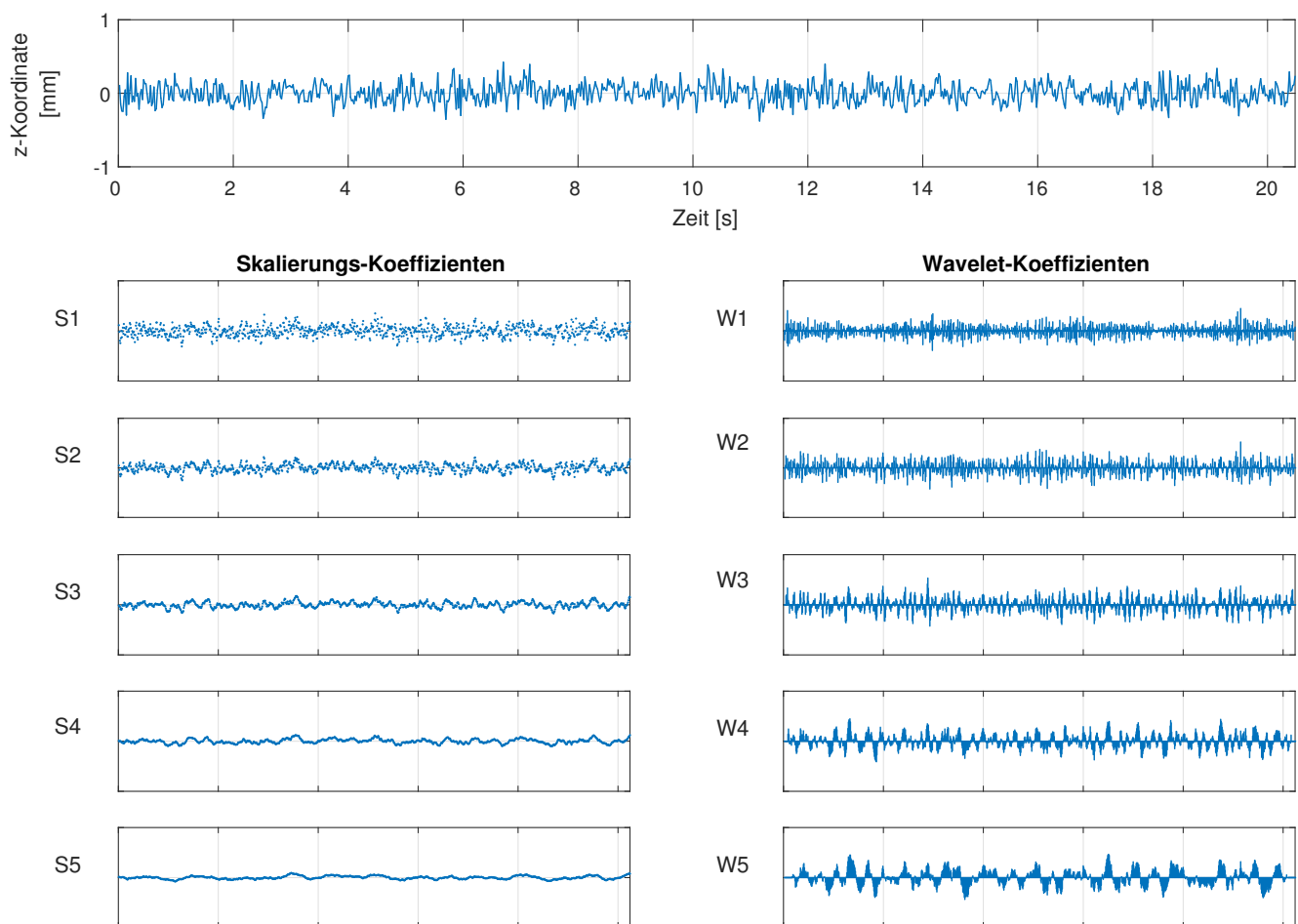
**Abb. 83.:** oben: Mit gaußschem weißem Rauschen (Std.: 0,15 mm) überlagerte simulierte Zeitreihe einer Zugüberfahrt. unten: Entsprechende Wavelet-Koeffizienten der ersten Zerlegungsstufe.



Zur Veranschaulichung der Thematik ist in **Abb. 83** zunächst ein synthetisches Beispiel dargestellt. Im oberen Diagramm ist eine simulierte Zugüberfahrt aufgetragen, die mit normalverteilten Zufallszahlen mit einer Standardabweichung von 0,15 mm überlagert ist. Im unteren Diagramm sind die mit dem Haar-Wavelet berechneten Wavelet-Koeffizienten der ersten Zerlegungsstufe dargestellt.

Der Vergleich der Standardabweichung der normalverteilten Zufallszahlen mit dem berechneten MAD zeigt eine komplette Übereinstimmung, d. h. bei einem Signal, das mit weißem gaußschen Rauschen überlagert ist, kann die Standardabweichung direkt aus den Wavelet-Koeffizienten der ersten Zerlegungsstufe bestimmt werden. Dies hat den großen Vorteil, dass zur Bestimmung der Unsicherheit der Zeitreihe bei entsprechender Voraussetzung nicht nur Signalausschnitte in Ruhe verwendet werden können, sondern auch Signalausschnitte, bei denen sich das Tragwerk in Bewegung befindet.

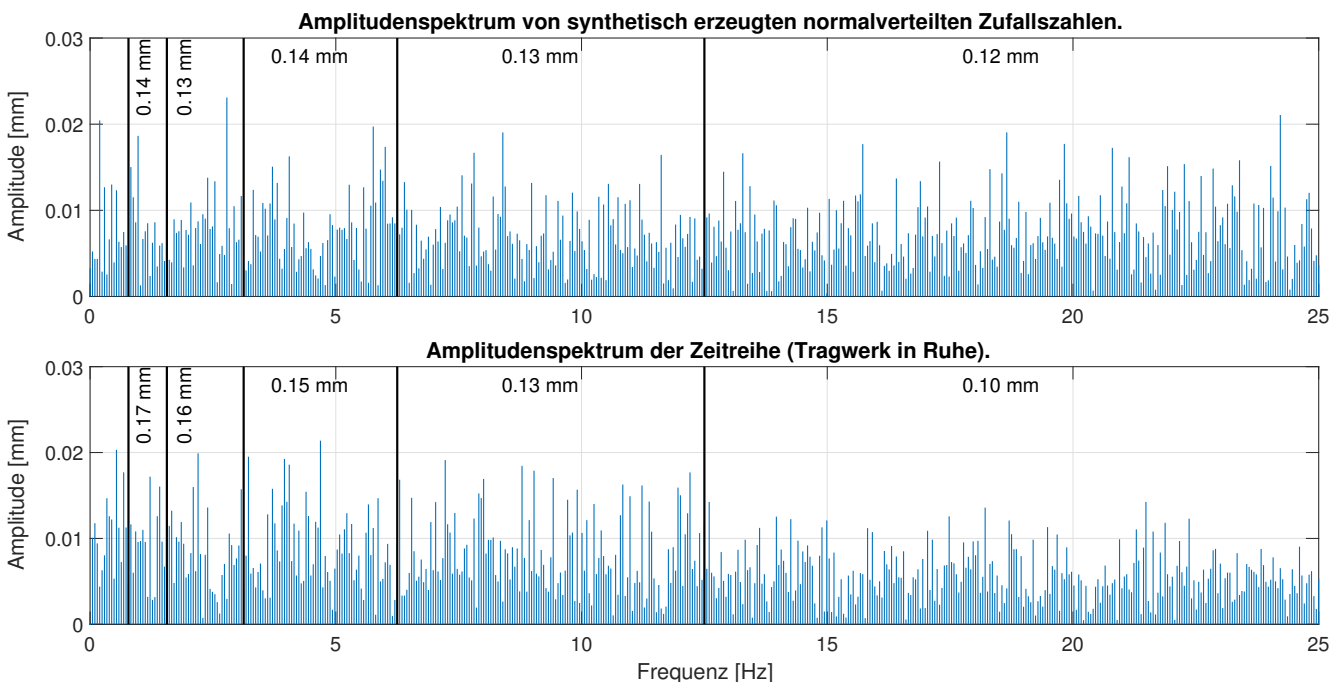
Aufbauend auf der Analyse einer „idealen“ synthetischen Zeitreihe ist in **Abb. 84** die Multiskalenanalyse einer realen Zeitreihe der z-Koordinate eines approximierten Tragwerkspunktes dargestellt. Um den direkten Vergleich zwischen der Standardabweichung im Zeitbereich und dem Ergebnis auf Basis der Wavelet-Koeffizienten zu ermöglichen, wird zunächst eine Zeitreihe verwendet, bei der sich das Tragwerk in Ruhe befindet, d. h. ohne Belastung. Im obersten Diagramm ist die eigentliche Zeitreihe aufgetragen, darunter sind auf der linken Seite die Skalierungs-Koeffizienten in den Skalen S1 bis S5 dargestellt und auf der rechten Seite die entsprechenden Wavelet-Koeffizienten in W1 bis W5.



**Abb. 84.:** Multiskalenanalyse der Zeitreihe (oberste Zeile). Auf der linken Seite sind die Skalierungs-Koeffizienten (in S1 bis S5) dargestellt, auf der rechten Seite die Wavelet-Koeffizienten (in W1 bis W5).

Bei diesem realen Datensatz ergibt sich die Standardabweichung im Zeitbereich zu 0,13 mm, wohingegen der MAD auf Basis der Wavelet-Koeffizienten 0,10 mm beträgt. Weitergehende Untersuchungen zeigen, dass der aus Zeitreihen eines approximierten Tragwerkspunktes berechnete MAD eher zu optimistisch geschätzt wird. Dies kann u. a. durch vorhandene Systematiken aufgrund von leichten Bewegungen des Tragwerks bzw. von systematischen Effekten in den Messungen des Profilschanners verursacht werden, aber auch durch Abweichungen des angenommenen Rauschmodells.

Zur genaueren Betrachtung dieses Zusammenhangs ist im oberen Diagramm in **Abb. 85** das Amplitudenspektrum von normalverteilten Zufallszahlen und im unteren Diagramm das Amplitudenspektrum der Zeitreihe aus **Abb. 84** dargestellt. Die schwarzen Linien separieren das Amplitudenspektrum in die Bereiche, die prinzipiell den Wavelet-Koeffizienten W1 bis W5 der einzelnen Zerlegungsstufen zugeordnet werden können. Zusätzlich ist für jeden Bereich der MAD der entsprechenden Zerlegungsstufe angegeben.



**Abb. 85.:** Vergleich der Amplitudenspektren eines synthetisch erzeugten Beispiels (oben) und einer realen Messung (unten, Tragwerk in Ruhe).

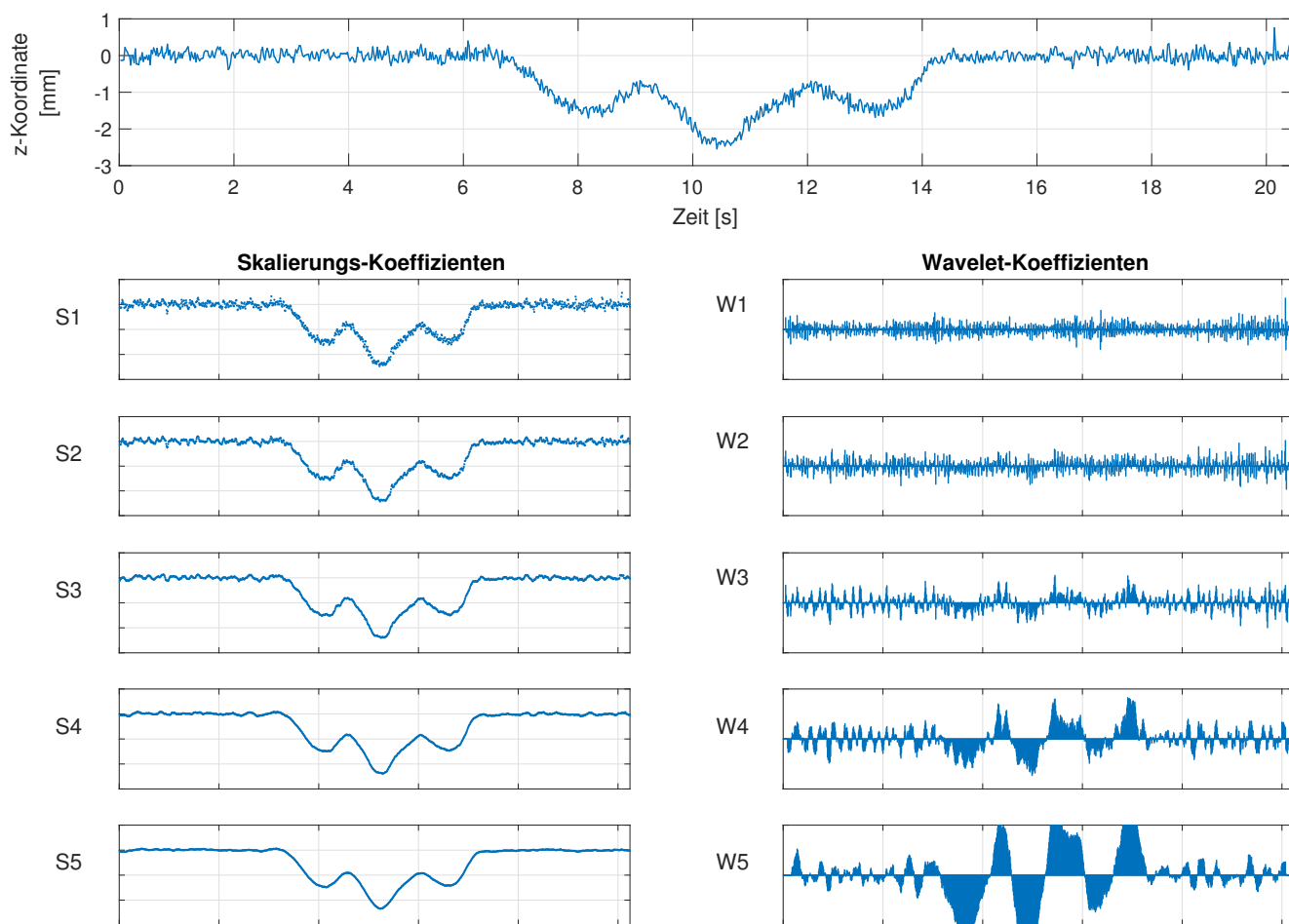
Bei dem synthetischen Beispiel kann prinzipiell in jeder Zerlegungsstufe die Unsicherheit korrekt bestimmt werden, wohingegen bei der realen Zeitreihe die Unsicherheit in höheren Frequenzbereichen abnimmt. Da gaußsches weißes Rauschen physikalisch unmöglich ist, vergleiche [Heu+13, S. 344, 358], wird bei dem realen Beispiel das Rauschniveau nicht homogen auf die einzelnen Skalen der Wavelet-Koeffizienten übertragen, was wiederum zu der verzerrten Schätzung führt.

Da niedrigere Frequenzbereiche bei Zeitreihen von Tragwerken in Bewegung durch bewegungsinduzierte Systematiken verfälscht werden, eignet sich meist nur die erste Zerlegungsstufe zur direkten Schätzung der Unsicherheit, siehe auch die Diagramme W3 bis W5 in **Abb. 86**. Falls Signalanteile lediglich in sehr niedrigen Frequenzbereichen vorliegen, wie es bei der Zugüberfahrt in **Abb. 86** der Fall ist, kann u. a. auch die zweite Skala zur Schätzung bzw. zur Verifizierung der Schätzung herangezogen werden. Entsprechend der Darstellung in **Abb. 85** kann so eine realitätsnähere Unsicherheit bestimmt werden. Bei enthaltenen bewegungsinduzierten Systematiken kann der MAD der zweiten Zerlegungsstufe auch als Abschätzung der oberen Grenze für die Unsicherheit angesehen werden.

Zukünftige Untersuchungen sollten sich auf entsprechende Ansätze zur Modellierung des Rauschens der approximierten Tragwerkspunkte konzentrieren, bei denen weitere Skalen mit in die Rauschmodellierung einbezogen werden. Dies führt unweigerlich zur Modellierung von farbigem Rauschen (insbesondere rosa Rauschen), siehe z. B. [PW00].

Zunächst kann jedoch die Aussage getroffen werden, dass im Rahmen der Tragwerksüberwachung die auf Basis der Wavelet-Koeffizienten der ersten Zerlegungsstufe bestimmten Unsicherheiten für die approximierten Tragwerkspunkte zu optimistisch geschätzt werden. Ein pragmatischer Ansatz, um diese Unterschätzung zu vermindern, besteht darin, den MAD entsprechend den empirischen Untersuchungen zu skalieren bzw. die zweite Zerlegungsstufe miteinzubeziehen.

Ergänzend zu der Analyse einer Zeitreihe, bei der sich das Tragwerk in Ruhe befindet, wird im Folgenden eine Zeitreihe der z-Koordinate eines approximierten Tragwerkspunktes betrachtet, bei der das Tragwerk belastet wird, siehe **Abb. 86** im obersten Diagramm. Der Aufbau der Darstellung entspricht der **Abb. 84**. Die Standardabweichung beträgt im Zeitbereich 0,69 mm, wohingegen der MAD auf Basis der Wavelet-

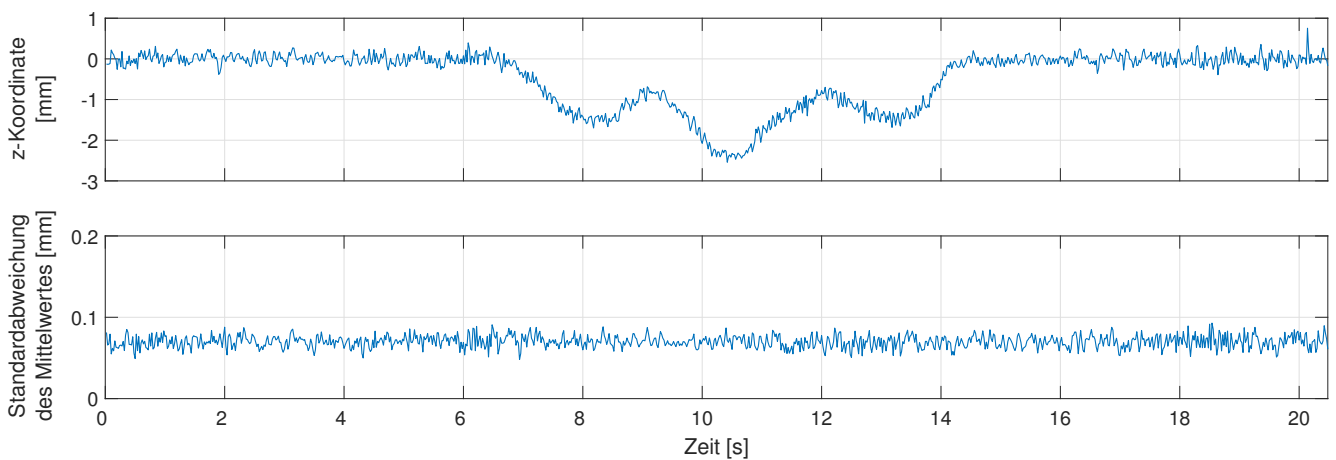


**Abb. 86.:** Multiskalenanalyse der Zeitreihe, Darstellung entsprechend **Abb. 84**.

Koeffizienten 0,11 mm beträgt. Es zeigt sich, dass mit den Wavelet-Koeffizienten auch während der Zugüberfahrt derselbe Wert für die Standardabweichung bestimmt wird, wie für die Ausschnitte in Ruhe. Im Zeitbereich wird die Unsicherheit der Zeitreihe aufgrund der Instationarität durch die Zugüberfahrt dagegen deutlich überschätzt.

Die so bestimmten Unsicherheiten können darüber hinaus verwendet werden, um die in Abschnitt 3.2.4 thematisierte Unsicherheitsschätzung im Rahmen der räumlichen Prozessierung zu verifizieren. Durch die Möglichkeit der redundanten Unsicherheitsbestimmung können so z. B. beim Einsatz der räumlichen Klassenbildung Aussagen über die adäquate Wahl der Klassengröße und Auswirkungen von räumlichen Korrelationen getroffen werden.

Die profilweise bestimmte (räumliche) Unsicherheit entsteht aus der Approximation der Tragwerksoberfläche, die im Wesentlichen von der erreichten Approximationsgüte abhängig ist. Das bedeutet, dass für jeden approximierten Tragwerkspunkt der Zeitreihe eine Schätzung für dessen Unsicherheit vorliegt. Der Vergleich der beiden Möglichkeiten der Unsicherheitsbestimmung ist in **Abb. 87** für die räumliche Klassenbildung exemplarisch dargestellt. Das obere Diagramm zeigt dabei dieselbe Zeitreihe wie **Abb. 86**. Im unteren Diagramm ist die Standardabweichung der Mittelwerte der räumlichen Klassen aufgetragen, die dem Klassenrepräsentant in dem entsprechenden Profil zugrunde liegt.



**Abb. 87.:** oben: Zeitreihe der z-Koordinate eines approximierten Tragwerkspunktes. unten: Zeitreihe der Standardabweichung des Mittelwertes der räumlichen Klasse.

Es zeigt sich, dass die räumlich bestimmte Standardabweichung mit im Mittel 0,07 mm deutlich zu optimistisch geschätzt wird, da die in Abschnitt 2.2.1 aufgezeigten räumlichen Korrelationen nicht berücksichtigt werden.

Durch diesen Zusammenhang können durch die redundante Unsicherheitsbestimmung Rückschlüsse auf die vorhandenen Korrelationen gezogen werden. Durch die Bildung des Quotienten aus der Standardabweichung der Mittelwerte zur Standardabweichung der Zeitreihe kann die effektive Anzahl der Freiheitsgrade, die für die Berechnung der Standardabweichung zur Verfügung stehen, bestimmt werden. Da diese beiden Werte im Idealfall übereinstimmen sollten, kann geschlussfolgert werden, dass der Unterschied größtenteils durch die vorhandenen räumlichen Korrelationen verursacht wird.

Die Betrachtung der räumlichen Standardabweichung über die Zeit ermöglicht zusätzlich die Verifizierung der Wahl der Klassengröße, indem die in Abschnitt 3.2.1 aufgestellte Forderung nach einem quasistatischen Klassenverhalten überprüft wird. Das bedeutet, dass es keine Relativbewegung des zu analysierenden Tragwerksausschnitts während der Messdauer des Klassenbereichs geben darf.

In der Zeitreihe der Standardabweichung der Messpunkte dürfen während der Zugüberfahrt keine systematischen Effekte auftreten, entsprechend der Darstellung im unteren Diagramm in **Abb. 87**.

Weiterhin kann die Schlussfolgerung getroffen werden, dass sich das Rauschverhalten während einer Belastung nicht signifikant ändert und damit die Bestimmung der Unsicherheit über Ausschnitte der Zeitreihe in Ruhe zulässig ist.

---

Durch die Unsicherheitsbestimmung der Zeitreihen kann somit ein vollständiges Messergebnis als Basis für die Tragwerksüberwachung bestimmt werden, das aus Zeitreihen von approximierten Tragwerkspunkten und entsprechenden Unsicherheiten besteht. Durch die Bestimmung der Unsicherheit über die Wavelet-Koeffizienten spielt es nahezu keine Rolle, ob sich das Tragwerk in Ruhe oder in Bewegung befindet. Darüber hinaus können aus dem Verhältnis von räumlicher zu zeitlicher Unsicherheit Rückschlüsse auf die Korrelationen innerhalb der Messprofile gezogen werden. Außerdem kann durch die Verifizierung der räumlichen Klassenbildung eine Evaluation stattfinden, ob die gewählte Klassengröße bei der individuellen Tragwerksbewegung den vorgegebenen Anforderungen entspricht.

---

### 3.4 Fazit

---

Die optimale Nutzung der Profilsclannermessungen für die Überwachung von Tragwerken wird erst durch die raumzeitliche Prozessierung der Messprofile ermöglicht. Um die sich dabei ergebenden Herausforderungen und die Umsetzung im Gesamtkonzept von Überwachungsmessungen besser einordnen zu können, wird ein Vergleich mit den in [Heu+13, S. 650 ff.] definierten Anforderungen für die flächenhafte bzw. profilhafte Erfassung von Deformationen durchgeführt. Im Folgenden sind zunächst die in [Heu+13] definierten Anforderungen zusammengefasst:

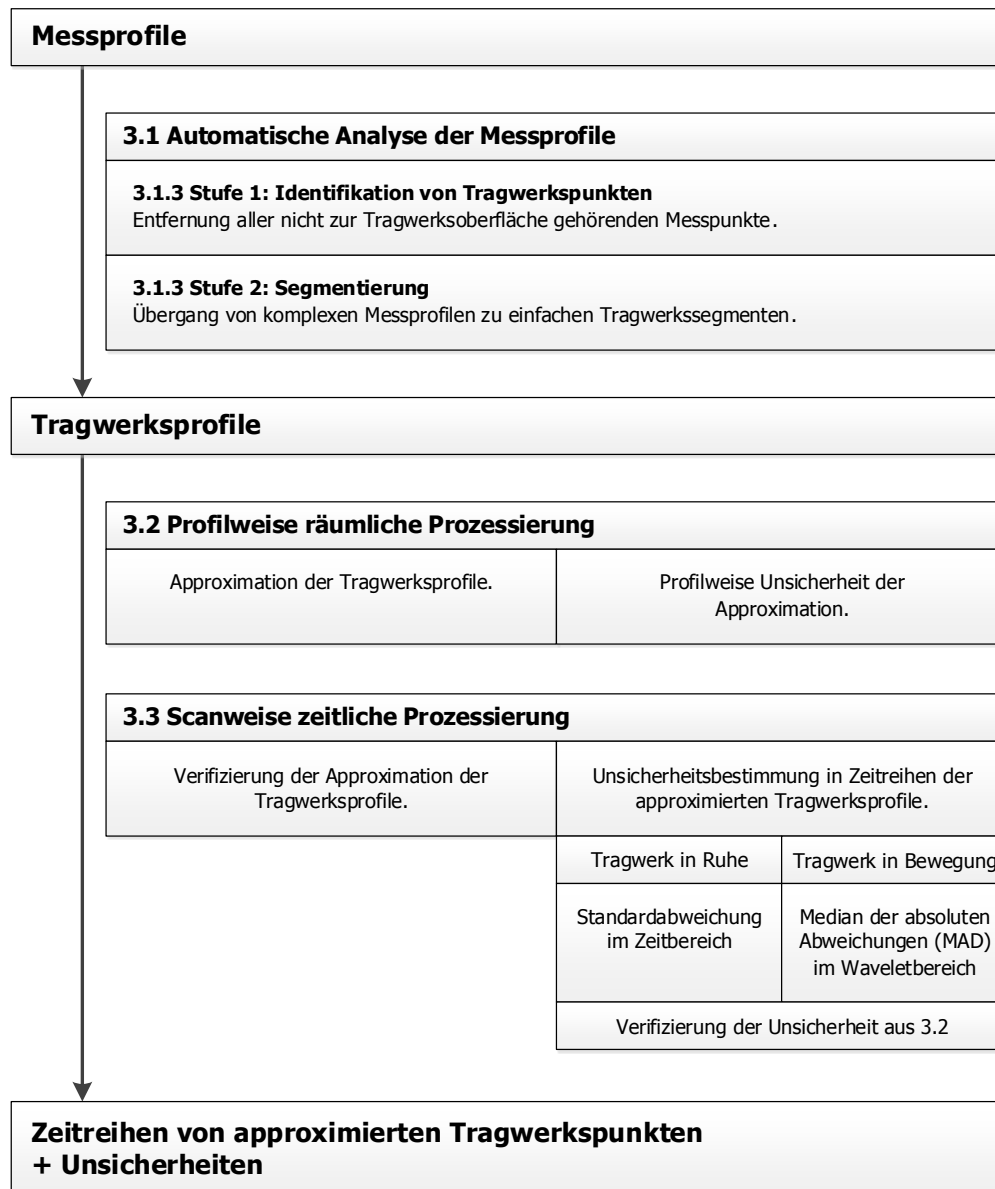
1. Umsetzung eines automatisierten und effizienten Auswerteprozesses, der Ausreißer und Datenlücken erkennen und kompensieren kann und dabei eine automatische Ergebnisableitung und Qualitätsbewertung bei konsequenter und umfassender Einbeziehung von Redundanzen ermöglicht.
2. Die statistische Bewertung der Messergebnisse hat weiterhin eine zentrale Bedeutung, ist oft aber nur durch eine Systemkalibrierung realisierbar.
3. Die Abhängigkeit von Vorwissen über das Überwachungsobjekt soll reduziert werden.
4. Aufgrund von unbekannten Unstetigkeitsstellen auftretende Unzulänglichkeiten in der Objektdiskretisierung sollen durch Kontinuierung behoben werden (z. B. durch den Einbezug der Finiten-Elemente-Methode (FEM)).

Die erste Forderung nach einem automatisierten und effizienten Auswerteprozess zur Ergebnisableitung ist aufgrund der großen Datenmengen beim Einsatz von TLS grundsätzlich von zentraler Bedeutung. Darüber hinaus sollen zusätzlich unregelmäßige Erscheinungen sowie Ausreißer und Datenlücken automatisch erkannt und kompensiert werden.

Die raumzeitliche Prozessierung der Profilsclannermessungen entspricht dieser Anforderung, da die Umsetzung vollkommen automatisch erfolgen kann und so aus einem ursprünglichen Profilsclan direkt Zeitreihen von approximierten Tragwerkspunkten extrahiert werden. In diesem Zusammenhang findet nicht nur eine Datenaufbereitung (Anbringen von Korrekturen und Reduktionen) statt, sondern es werden automatisch Ausreißer erkannt und korrigiert, siehe Abschnitt 3.1 und 3.3.

Der dabei zum Einsatz kommende dreiteilige Ablauf ist in **Abb. 89** noch einmal schematisch dargestellt und gliedert sich entsprechend den Abschnitten in:

- 3.1 Die zweistufige automatische Analyse zur Erzeugung von Tragwerksprofilen durch Erkennung und Eliminierung von Fehlmessungen und Unstetigkeiten in den Messprofilen und der darauf basierenden Segmentierung.
- 3.2 Die räumliche Prozessierung zur Approximation der Tragwerksprofile und die Schätzung von profilweisen Unsicherheiten.
- 3.3 Die zeitliche Prozessierung zur Erkennung und Korrektur von verbleibenden Fehlmessungen und systematischen Verfälschungen, inklusive der Bestimmung bzw. Verifikation von Unsicherheiten für die Zeitreihen von approximierten Tragwerkspunkten.



**Abb. 89.:** Raumzeitliche Prozessierung von Profilsclannermessungen.

---

Durch die Verifikation und Korrektur der Ergebnisse der zeitlichen und räumlichen Analyse bzw. Prozessierung werden vorhandene Redundanzen konsequent ausgenutzt. Dies gilt insbesondere für die statistische Bewertung der Messergebnisse entsprechend der zweiten Anforderung. Durch die hohe zeitliche Auflösung der Profilsclannermessungen und der waveletbasierten Unsicherheitsbestimmung kann auf eine (Labor-)Systemkalibrierung verzichtet werden und stattdessen eine in situ Unsicherheitsbestimmung durchgeführt werden.

Des Weiteren lassen sich durch die Verifikation der räumlichen und zeitlichen Prozessierung Informationen über auftretende räumliche Korrelationen zwischen benachbarten Messpunkten gewinnen und die korrekte Wahl der Klassengröße (quasistatisches Klassenverhalten) überprüfen. Darüber hinaus kann die Annahme eines konstanten Rauschniveaus für Tragwerke in Bewegung dadurch ebenfalls verifiziert werden, siehe Abschnitt 3.3.4.

Durch die nahezu kontinuierliche räumliche Erfassung bei gleichzeitig hoher zeitlicher Abtastung kann die Abhängigkeit von Vorwissen entsprechend der dritten Forderung durch den Einsatz des Profilsclanners reduziert werden, da auch nachträglich die Möglichkeit besteht, an nahezu beliebigen Positionen des Tragwerks Messwerte abzuleiten. Somit ist eine exakte Planung vorab nur noch bedingt notwendig. Darüber hinaus ermöglicht die nahezu kontinuierliche Erfassung eine verbesserte Identifizierung von Unstetigkeitsstellen und somit die Vermeidung von Fehlinterpretationen. Falls doch Vorwissen über etwaige Unstetigkeitsstellen vorhanden ist, besteht die Möglichkeit, die Approximation der Tragwerksoberfläche gezielt in diesen Bereichen zu verdichten, um so aussagekräftigere Ergebnisse zu erhalten.

Die vierte Anforderung verlangt Vorwissen zum kontinuumsmechanischen Verhalten des Messobjektes. Wenn dies vorhanden ist, kann die nahezu kontinuierliche räumliche Erfassung des Profilsclanners dazu genutzt werden, diese Information optimal einzusetzen. Im Rahmen einer integrierten Analyse, siehe u. a. [Lie07], bei der homologe Punkte auf Basis von FEM Berechnungen mit realen Messwerten verarbeitet werden, können Konfigurationsdefekte vermieden werden, da die Anzahl an Messpunkten an die Anzahl und Position der mittels FEM berechneten Knoten angepasst werden kann.

Falls keine entsprechende Vorinformation vorhanden ist, kann eine Kontinuierung bzw. eine Verknüpfung getrennter Messstellen (Teilnetze) über die Profilsclannermessungen erfolgen. Somit bleibt eine strikte Trennung von Theorie und Empirie in Form von Messungen erhalten.

Abschließend sind die wichtigsten Aspekte der Umsetzung der raumzeitlichen Prozessierung von Messprofilen noch einmal stichpunktartig zusammengefasst:

- Durch die automatische Korrektur von Ausreißern und systematischen Verfälschungen im Orts- und Zeitbereich kann die maximale Messinformation erhalten werden.
- Durch die Approximation der Tragwerksprofile wird eine Genauigkeitssteigerung der approximierten Tragwerkspunkte im Vergleich zu den ursprünglichen Koordinatenwerten realisiert.
- Die Ableitung von Unsicherheiten ist auch für Tragwerke in Bewegung möglich.
- Durch die Ausnutzung der Redundanzen können die angenommenen Parameter, wie die Klassengröße und das Rauschverhalten, verifiziert werden.
- Durch die Verifizierung der Ergebnisse der räumlichen und zeitlichen Prozessierung können Informationen über räumliche Korrelationen abgeleitet werden.
- Die Segmentierung der Tragwerksoberfläche kann auch als Aufbereitung im strukturdynamischen Sinne weiterverwendet werden.

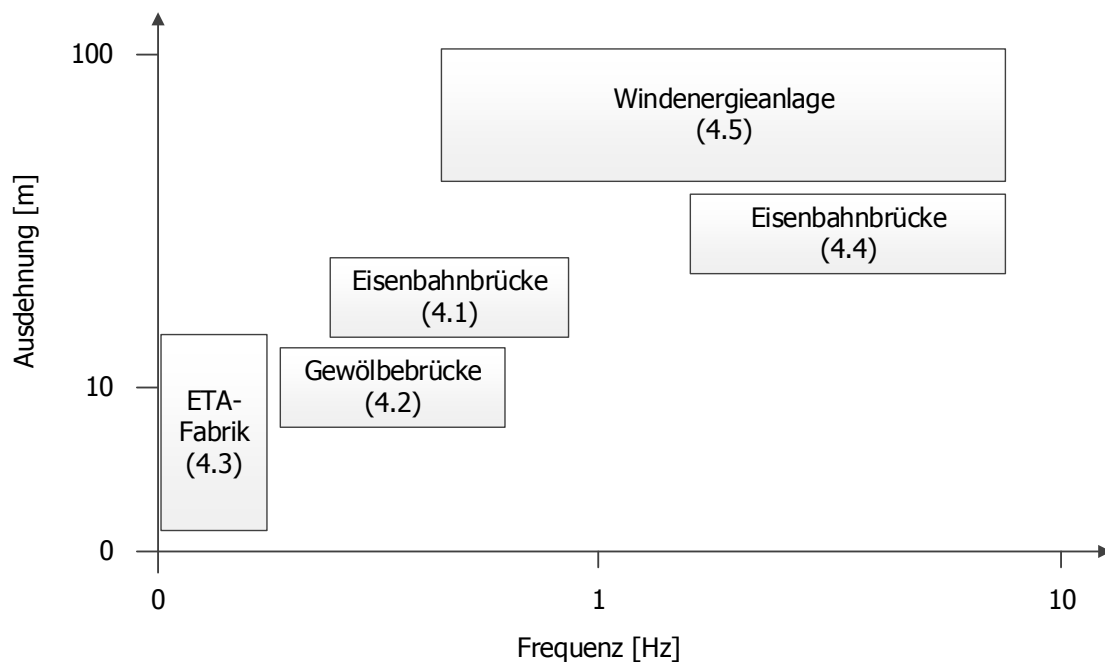


---

## 4 Beispiele für die Überwachung von Tragwerken mit Profilsclannern

---

Im Folgenden werden ausgewählte Beispiele zur Überwachung von Tragwerken betrachtet. Diese reichen von Eisenbahnbrücken bis hin zu Windenergieanlagen und decken das gesamte Spektrum der Anwendungsmöglichkeiten von Profilsclannern ab. Der untersuchte Frequenzbereich von 0 bis 10 Hz entspricht den typischerweise bei Tragwerken auftretenden Frequenzen. Die Ausdehnung der untersuchten Tragwerke reicht dabei von wenigen Metern (ETA-Fabrik) bis zu mehr als 50 m (Windenergieanlage). In **Abb. 91** sind die ausgewählten Beispiele in diesem Kontext dargestellt.



**Abb. 91.:** Einordnung der Beispiele zur Tragwerksüberwachung mit Profilsclannern in Orts- und Frequenzbereich.

Grundsätzlich können die Beispiele innerhalb des Anwendungsspektrums in zwei Gruppen gegliedert werden:

- Analyse Typ 1: Bestimmung von quasistatischen Verformungsanteilen,
- Analyse Typ 2: Bestimmung von dynamischen Verformungsanteilen.

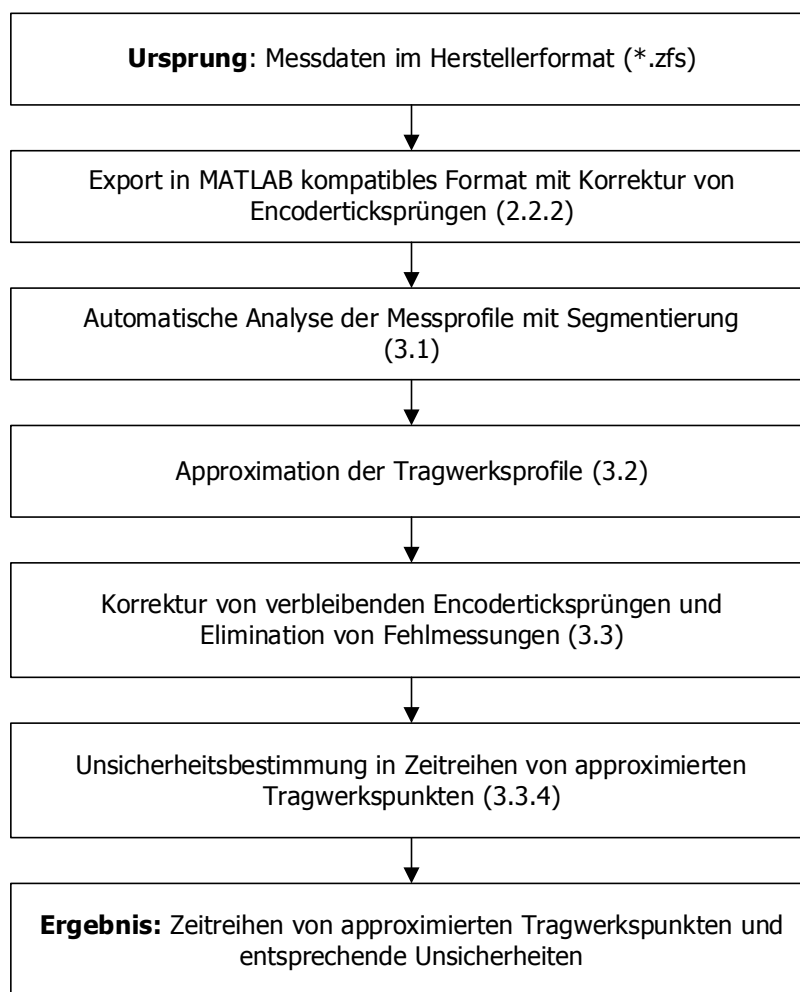
Zum ersten Typ gehören die Überwachung von Eisenbahnbrücken bei Zugüberfahrten in Abschnitt 4.1 und der Belastungsversuch einer historischen Gewölbebrücke in Abschnitt 4.2 sowie die Verformung eines Fabrikhallenquerschnittes aufgrund thermischer Einwirkung, siehe Abschnitt 4.3.

Die Beispiele des zweiten Typs beinhalten die Überwachung einer dynamisch angeregten Eisenbahnbrücke, siehe Abschnitt 4.4 und die Bestimmung der Horizontalverformung bzw. Eigenform einer Windenergieanlage, siehe Abschnitt 4.5.

Darüber hinaus sollen mit diesen Beispielen weitere Aspekte des Profilsclannereinsatzes bei Überwachungsmessungen adressiert werden:

- Die Unsicherheitsbestimmung,
- der Vergleich mit weiteren Sensoren,
- die Wahl der räumlichen Prozessierungsmethode,
- der Einsatz des Wavelet-Denoising im Zeitbereich.

Für die Beispiele aus beiden Gruppen kommt zunächst die in Kapitel 3 vorgestellte raumzeitliche Prozessierung von Profilsclannermessungen zum Einsatz. In **Abb. 92** ist der gesamte Ablauf der einzelnen Prozessierungsschritte noch einmal zusammengefasst, beginnend mit den Messdaten im Herstellerformat bis hin zu den finalen Zeitreihen von approximierten Tragwerkspunkten.



**Abb. 92.:** Grundlegendes Auswerteschema der Profilsclannermessungen zur Überwachung von Tragwerken.

Ergänzend zu diesem Auswerteschema wird in jedem Beispiel an der entsprechenden Stelle auf die Wahl der räumlichen Prozessierungsmethode bzw. auf weitere zusätzliche Prozessierungsschritte eingegangen. Aufgrund des im Rahmen der Tragwerksüberwachung zu erwartenden Frequenzbereichs wurden sämtliche Messungen mit einer Rotationsgeschwindigkeit von 50 Hz und einer Lasermessrate von 1.017 kHz durchgeführt.

#### 4.1 Einfeldträgerbrücke über die Flanitz bei Klingenbrunn

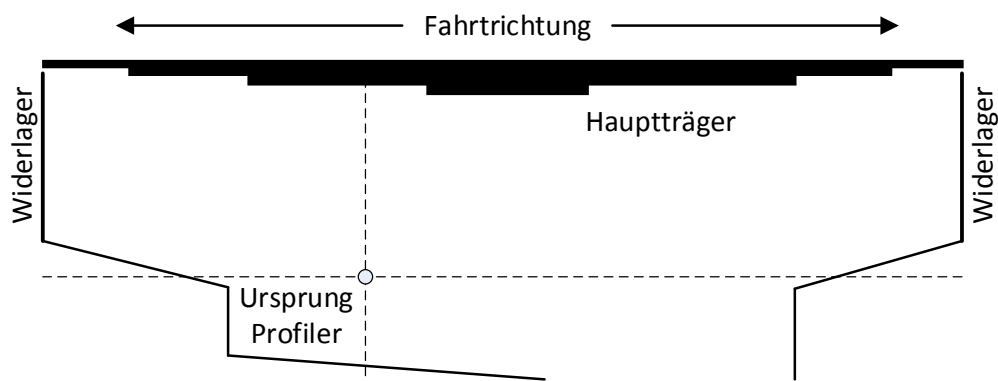
Bei dem untersuchten Ingenieurbauwerk handelt es sich um eine über einhundert Jahre alte eingleisige Eisenbahnüberführung mit einer Spannweite von knapp 20 m auf der Strecke von Zwiesel nach Grafenau (Strecke 5821, Kilometer 15,4). Die Hauptträger sind als vollwandige Stahlträger ausgeführt und sitzen lediglich auf zwei Widerlagern auf, siehe **Abb. 93.a**. Die Brücke wurde nachträglich um zwei Fußwege erweitert, die mit der eigentlichen Brücke jedoch nur durch die Widerlager verbunden sind. In **Abb. 93.a** ist im Vordergrund einer der beiden Fußwege zu sehen.



**Abb. 93.a.:** Seitenansicht der Einfeldträgerbrücke.

In **Abb. 93.b** ist ein schematischer Längsschnitt durch die Brückenstruktur entlang eines Hauptträgers dargestellt. Da die beiden Hauptträger vom Aufbau her identisch sind, ist diese Abbildung repräsentativ für beide Hauptträger.

Diese bestehen jeweils aus zwei stählernen Vollwandträgern, die in der Mitte der Brücke miteinander verbunden sind. Zur Verbindung und Stabilisierung der beiden Teile der Hauptträger sind diese zur Mitte der Brücke hin zusätzlich ausgesteift. Dies ist in **Abb. 93.b** stark überhöht durch die zunehmende Dicke des Hauptträgers angedeutet.



**Abb. 93.b.:** Schematischer Aufbau der Brückenhauptträger.

Die Aussteifung quer zur Brückenachse ist ebenfalls mit vollwandigen Stahlträgern ausgeführt, deren Struktur im oberen Bereich von **Abb. 94.a** gut zu erkennen ist.

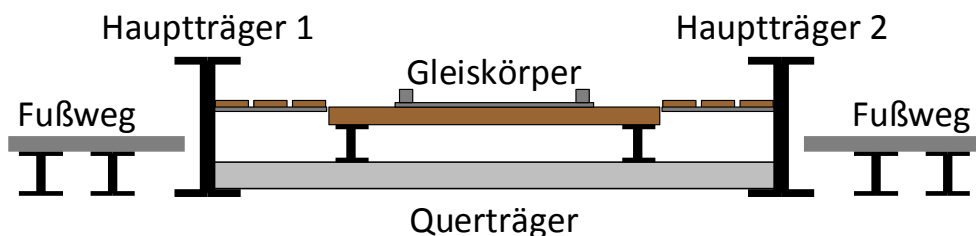


**Abb. 94.a.:** Unterseite des Brücke mit angebrachter Sensorik und dem Profils Scanner.

In **Abb. 94.b** ist der schematische Querschnitt durch die Brückenstruktur dargestellt. Zunächst muss zwischen der Brücke und den davon entkoppelten Fußwegen unterschieden werden.

Die Fußwege sind jeweils auf zwei kleineren Vollwandträgern aus Stahl gelagert. Da zwischen diesen Baugruppen jedoch keine direkte Verbindung besteht, sind die Fußwege nicht Teil des eigentlichen Messobjektes.

Der Gleiskörper der Brücke sitzt zunächst auf kleineren Längsträgern auf, die anschließend, wie in **Abb. 94.a** zu erkennen ist, mit den Hauptträgern verstrebt sind. Diese Art der Querverstrebung ist in etwa alle 3 m realisiert. Zusätzlich existieren innerhalb der 3-m-Abstände weitere diagonale Querverstreibungen, die ebenfalls in **Abb. 94.a** erkennbar sind.



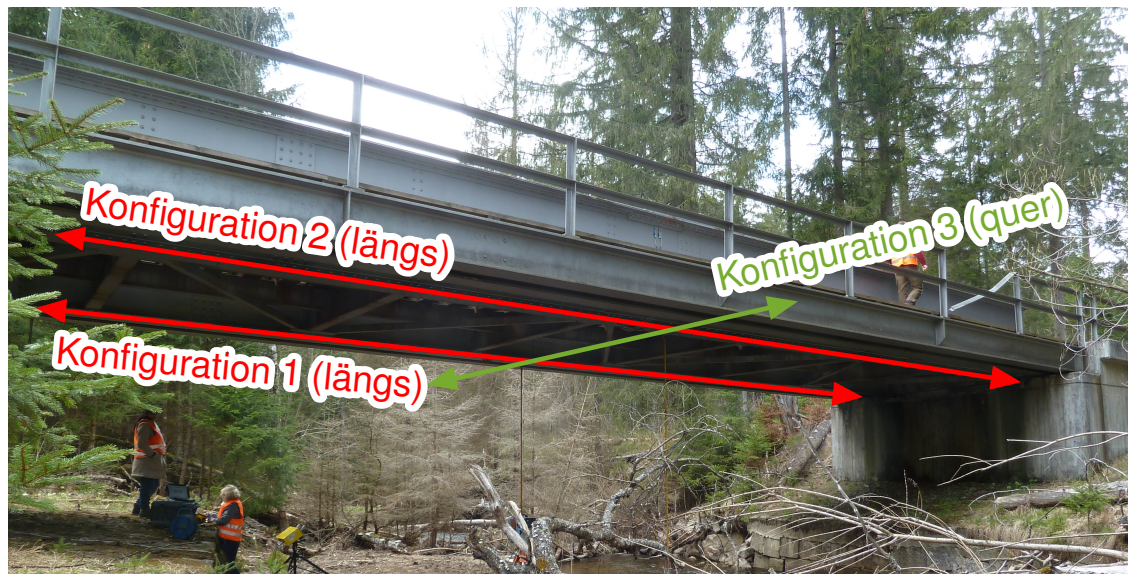
**Abb. 94.b.:** Schematischer Aufbau der Brücke quer zur Brückenachse.



#### 4.1.1 Messdaten

Mit dem Profils Scanner wurden insgesamt drei verschiedene Messkonfigurationen realisiert, welche in **Tab. 95** und **Abb. 95** dargestellt sind.

Die Messungen fanden bei regulärem Bahnbetrieb statt. Bei den dort verkehrenden Zügen handelt es sich um Regio-Shuttle RS1 mit einem Leergewicht von ca. 41 t und einer Geschwindigkeit bei der Brückenüberfahrt von ca. 30 km/h. Die einzelnen Überfahrten unterscheiden sich somit hauptsächlich durch die Fahrtrichtung des Zuges und die Anzahl der eingesetzten Wagen (1 oder 2 Regio-Shuttle RS1).



**Abb. 95.:** Seitenansicht der Einfeldträgerbrücke mit eingezeichneten Messachsen.

Die gemessenen Konfigurationen sind in **Abb. 95** farbig dargestellt. Die Messungen auf den Hauptträgern 1 und 2 in Längsrichtung der Brücke sind rot markiert und die Messung quer zur Fahrtrichtung ist in grün eingezeichnet. In **Tab. 95** sind zusätzlich die Anzahl der Wagen und etwaige Vergleichssensoren aufgeführt.

Konfiguration	Messrichtung	Züge
1	Hauptträger 1 längs	Regio-Shuttle RS1 Einzelwagen
2	Hauptträger 2 längs	Regio-Shuttle RS1 Doppelwagen
3	Hauptträger 1 und 2 quer	Regio-Shuttle RS1 Einzelwagen

**Tab. 95.:** Durchgeführte Messkonfigurationen, siehe auch **Abb. 95**.

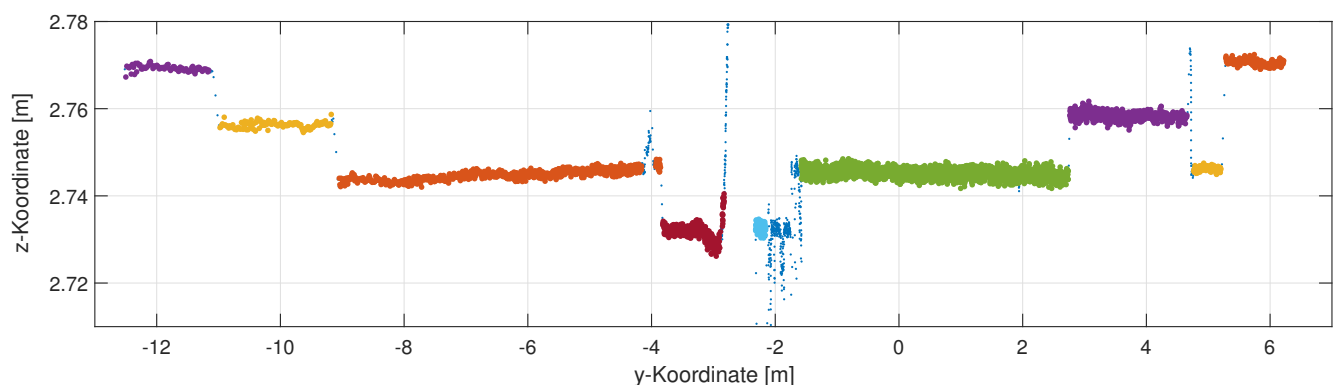
Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse der automatischen Analyse der Messprofile der Konfigurationen 1 und 2 in Längsrichtung näher betrachtet, siehe **Abb. 96.a** und **Abb. 96.b**.

Entsprechend den Ausführungen aus Abschnitt 3.1 werden bei der automatischen Analyse der Messprofile Fehlmessungen sowie störende Tragwerksdetails entfernt. Im Anschluss daran wird die Struktur der Tragwerksoberfläche anhand ihrer Details segmentiert. Die so entstehenden Tragwerkssegmente sind in beiden

Abbildungen farblich von der ursprünglichen Profilmessung (in blau) hervorgehoben. Die tatsächliche Oberflächenstruktur der Hauptträger führt zu einer Segmentierung in acht Tragwerkssegmente, siehe **Abb. 96.b**.

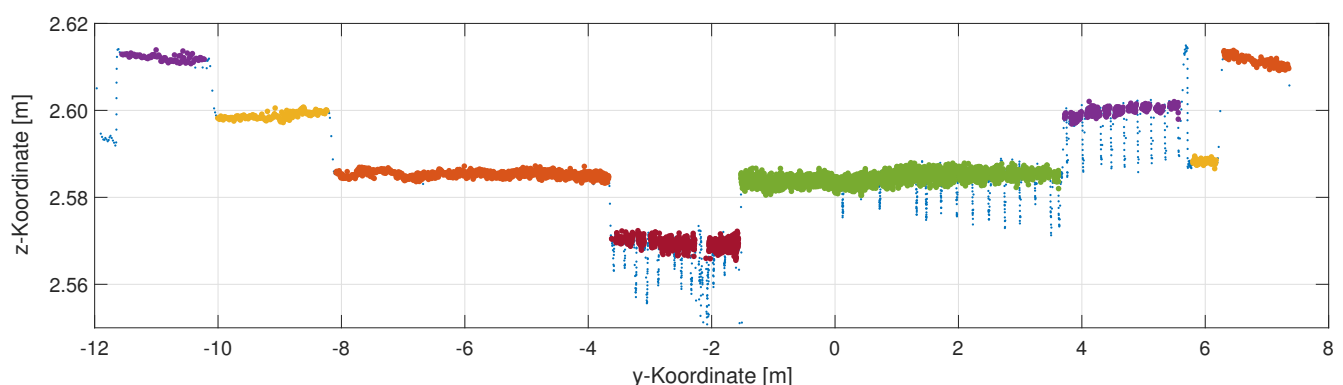
Da die Messkampagne als Vergleichsmessung zwischen dem Profils Scanner, einem terrestrischen Mikrowelleninterferometer und klassischen Sensoren der Brückenmesstechnik angelegt war, befanden sich zum Zeitpunkt der Messung weitere Sensoren an der Brücke. Bei diesen Sensoren handelte es sich um Dehnungsmessstreifen, Beschleunigungsmesser und induktive Wegaufnehmer.

Diese adaptierte Sensorik führt bei allen Messungen der Konfigurationen 1 bzw. 2 zu Ausreißern, die sich in beiden Abbildungen hauptsächlich in der Mitte des Tragwerks (y-Koordinate: -2 m) zeigen. Bei der in **Abb. 96.a** dargestellten Messung kommt es aufgrund der Sensorik sogar zu einer weiteren Segmentierung, sodass insgesamt neun Segmente entstehen.



**Abb. 96.a.:** Automatisch segmentiertes Messprofil in Längsrichtung am Hauptträger 1.

Am Ergebnis der Segmentierung in **Abb. 96.b** zeigt sich das große Potenzial der automatischen Analyse im Frequenzbereich basierend auf der Wavelet-Transformation: Trotz des sehr komplexen Tragwerksprofils aufgrund von Nieten kann die Struktur der Tragwerksoberfläche optimal aus dem Messprofil extrahiert werden. Dabei entspricht die Segmentierung exakt der tatsächlichen Struktur der Tragwerksoberfläche, da sämtliche Unstetigkeiten erkannt und eliminiert wurden.



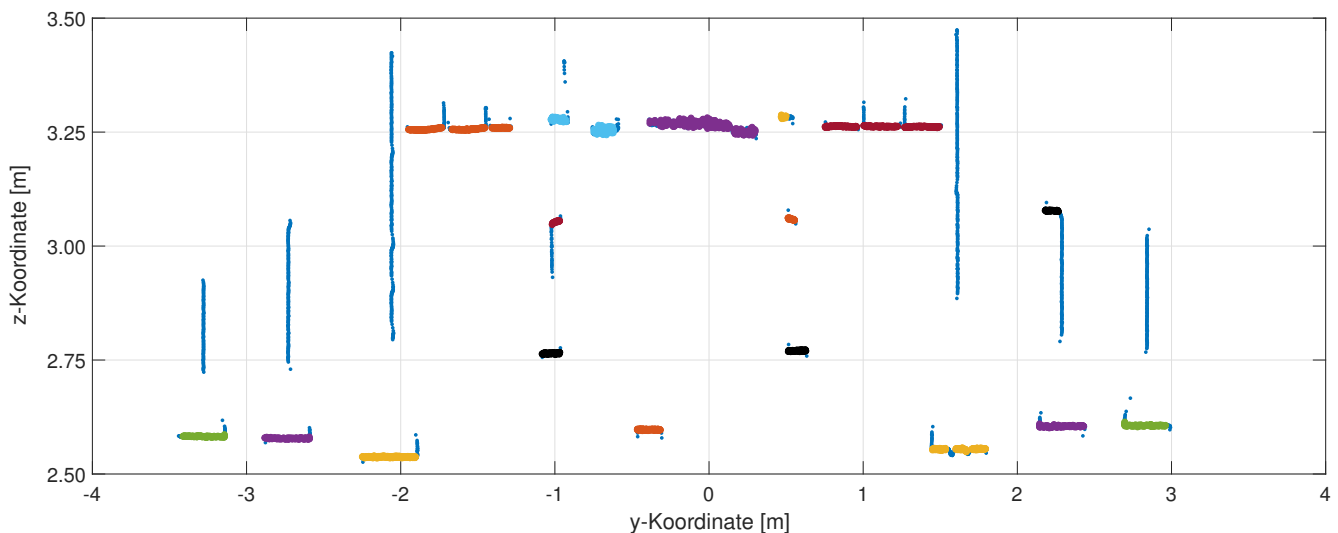
**Abb. 96.b.:** Automatisch segmentiertes Messprofil in Längsrichtung am Hauptträger 2.

**Abb. 97** zeigt das Ergebnis der Konfiguration 3, bei der die Messung quer zur Brückenachse durchgeführt wurde. Auch hier entsteht aufgrund der einzelnen Bauteile (Hauptträger, Fußwege, Verstrebungen, usw.) ein stark strukturiertes Messprofil. Dessen Charakteristik hebt sich von den Brückenhauptträgern in Längsrichtung jedoch deutlich ab, da die Strukturierung des Messprofils hauptsächlich durch die

voneinander getrennten Bauteile entsteht und so die Abstände in horizontaler und vertikaler Richtung deutlich größer sind als bei den Längsprofilmessungen.

Der Vergleich mit Abb. 94.a und Abb. 94.b zeigt, dass die Querprofilmessung nicht entlang eines Querträgers stattfand, sondern im Bereich zwischen zwei Querträgern.

Von außen nach innen sind in Abb. 97 zunächst jeweils die beiden Stahlträger der Fußwege zu sehen (in grün und lila), gefolgt von den Hauptträgern in gelb. In der Mitte des Profils ist im oberen Bereich die Unterseite des Gleisbetts zu erkennen und im unteren Bereich die beiden kleineren Längsträger (in schwarz), auf denen das Gleisbett aufliegt. Die schräge Querverstrebung im Bereich der y-Koordinate -0,5 m ist in orange eingefärbt, vergleiche Abb. 94.a.



**Abb. 97.:** Automatisch segmentiertes Profil in Querrichtung der Brücke auf Höhe der Referenzsensoren (Konfiguration 3).

Mit der automatischen Analyse der Messprofile ist die Grundlage für alle weiteren Untersuchungen gelegt. Darauf basierend können mit den in Abschnitt 3.2 vorgestellten Methoden Tragwerkspunkte approximiert werden. Durch den Zeitbezug der Tragwerksprofile liegen die approximierten Tragwerkspunkte als Zeitreihe vor. Auf deren Basis sollen im Folgenden speziell einzelne Aspekte der Analysemöglichkeiten für Tragwerke mittels Profilschanning näher betrachtet werden. Bei diesem Beispiel wird lediglich die räumliche Klassenbildung eingesetzt, da aufgrund der starken Strukturierung der Messprofile eine globale Approximation nicht sinnvoll ist.

#### 4.1.2 Bestimmung der Unsicherheit der approximierten Tragwerkspunkte

Entsprechend den Ausführungen aus Abschnitt 2.3.2 wird zur vollständigen Angabe des Messergebnisses auch die Messunsicherheit benötigt, welche im Folgenden durch eine in situ Unsicherheitsbestimmung ermittelt wird. Bei der Unsicherheitsbestimmung im Rahmen der Tragwerksüberwachung mit Profilschannern werden Unsicherheiten für die approximierten Tragwerkspunkte bestimmt, die nach der raumzeitlichen Prozessierung in Form von Zeitreihen vorliegen. Somit können grundsätzlich die Methoden der Zeitreihenanalyse verwendet werden. Der in Abschnitt 3.3.4 vorgestellte Ansatz soll im Folgenden exemplarisch veranschaulicht werden.

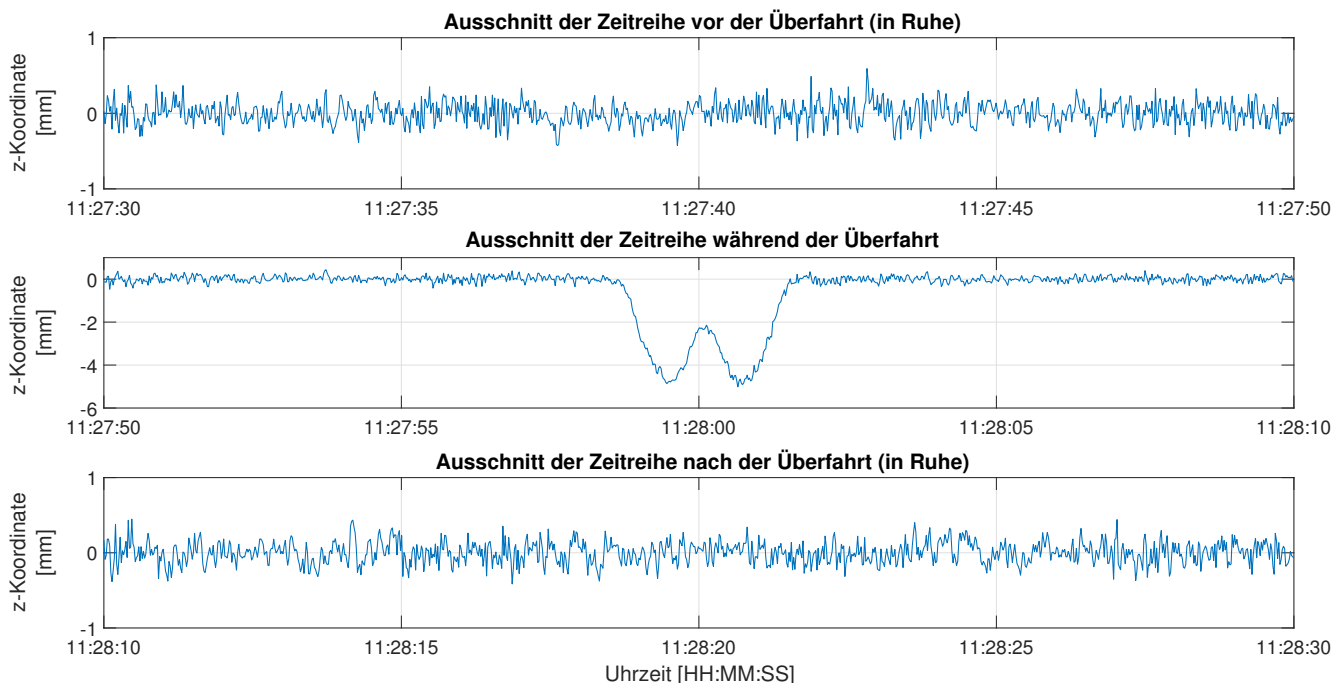
Da sich Eisenbahnbrücken außer bei einer Zugüberfahrt in Ruhe befinden, kann in diesen Zeiträumen die Unsicherheit direkt im Zeitbereich berechnet werden. Zusätzlich kann die Unsicherheit während der Zugüberfahrt im Waveletbereich bestimmt und so auch die Trennung zwischen Signal- und Rauschanteilen



ermöglicht werden. Durch diesen kombinierten Ansatz wird die zugehörige Messunsicherheit direkt aus den entsprechenden Messwerten berechnet.

In **Abb. 98** ist die Zeitreihe der z-Koordinate des Klassenrepräsentanten für das in **Abb. 96.a** türkis eingefärbte Segment am Hauptträger 1 der Brücke dargestellt. Aufgrund der geringen räumlichen Ausdehnung von 150 mm beinhaltet das Segment lediglich 115 Messpunkte und wird im Folgenden als eine Klasse betrachtet.

In den einzelnen Diagrammen in **Abb. 98** sind jeweils Ausschnitte der Zeitreihe vor, während und nach einer Zugüberfahrt dargestellt. Da sich die Brücke vor und nach der Zugüberfahrt in Ruhe befindet, kann die Unsicherheit des approximierten Tragwerkspunktes mit diesen Ausschnitten direkt im Zeitbereich berechnet werden. Die Standardabweichung des Klassenrepräsentanten für das Tragwerk in Ruhe beträgt ca. 0,15 mm.



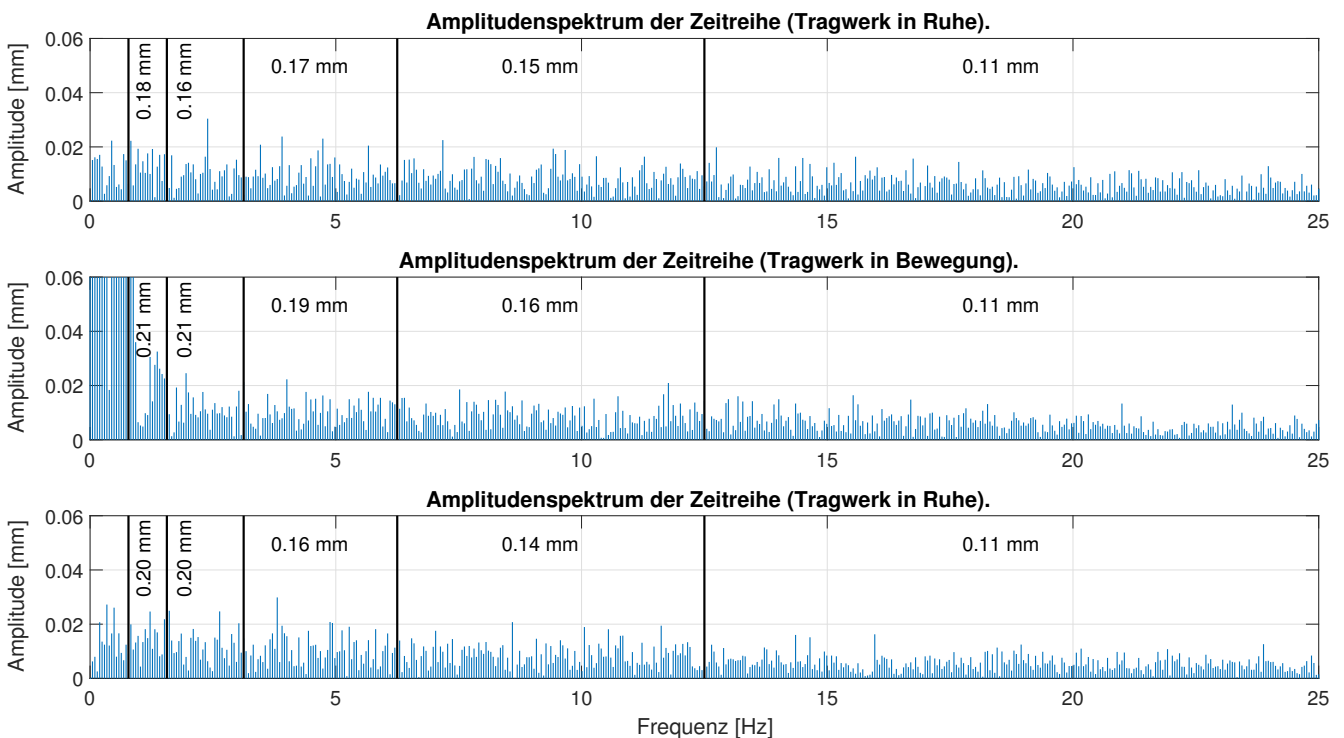
**Abb. 98.:** Zeitreihen des Klassenrepräsentanten der türkisfarbenen Klasse, siehe **Abb. 96.a**. Zu beachten ist die abweichende y-Achsenskalierung des mittleren Diagramms.

Im Waveletbereich kann darüber hinaus die Unsicherheit sowohl während der Überfahrt als auch zu den Zeitpunkten, in denen sich das Tragwerk in Ruhe befindet, geschätzt werden. Mit diesen Ergebnissen lässt sich ein direkter Vergleich beider Methoden durchführen. Der Median der absoluten Abweichungen (MAD) auf Basis der Wavelet-Koeffizienten der ersten Zerlegungsstufe ergibt für alle drei Ausschnitte 0,11 mm.

Entsprechend den Ausführungen aus Abschnitt 3.3.4 wird die auf Basis der Wavelet-Koeffizienten der ersten Zerlegungsstufe bestimmte Unsicherheit zu optimistisch geschätzt. Unter Berücksichtigung des dort dargestellten Zusammenhanges kann die Unsicherheit entweder entsprechend skaliert oder weitere Zerlegungsstufen miteinbezogen werden.

In **Abb. 99** sind die Amplitudenspektren der in **Abb. 98** abgebildeten Ausschnitte der Zeitreihe dargestellt. Die schwarzen Linien separieren das Amplitudenspektrum in die Bereiche, die prinzipiell den Wavelet-Koeffizienten W1 bis W5 der jeweiligen Zerlegungsstufe zugeordnet werden können. Zusätzlich ist für jeden Bereich der MAD dieser Zerlegungsstufe angegeben. Es zeigt sich, dass sich die niederfrequente Zugüberfahrt kaum auf die Wavelet-Koeffizienten der zweiten Zerlegungsstufe auswirkt und

der MAD verglichen mit den Ergebnissen im Zeitbereich (0,15 mm) eine gute Abschätzung für die Koordinatenunsicherheit des approximierten Tragwerkspunktes von ungefähr 0,16 mm liefert.

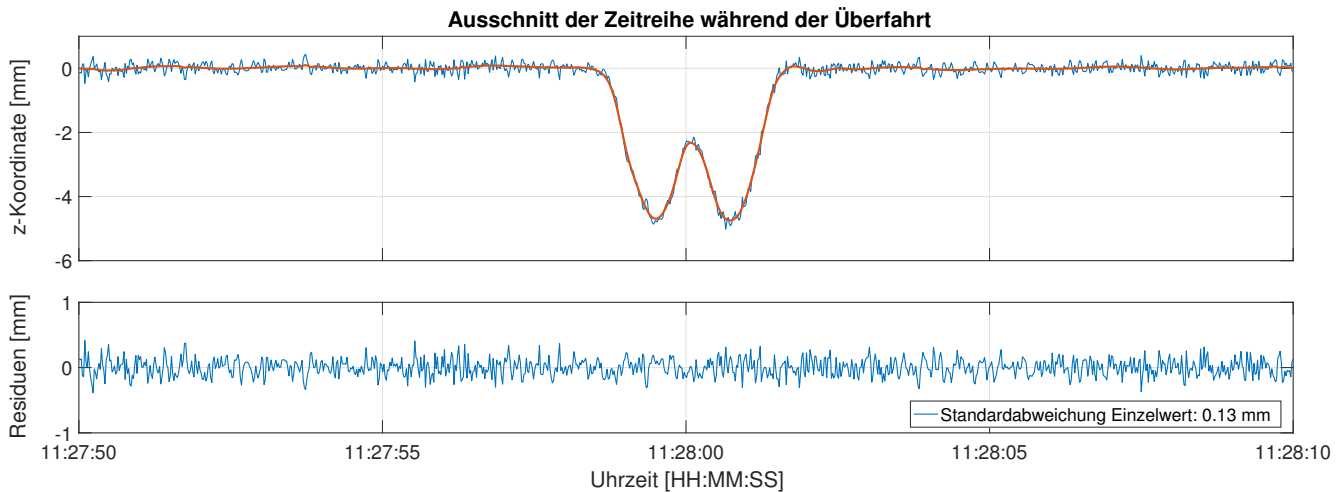


**Abb. 99.:** Vergleich der Amplitudenspektren der Zeitreihenausschnitte für das Tragwerk in Ruhe und in Bewegung.

Basierend auf dieser kombinierten Unsicherheitsbestimmung kann die Zeitreihe der z-Koordinate des approximierten Tragwerkspunktes mittels Wavelet-Denoising in den tatsächlichen Signalanteil und das überlagerte Rauschen aufgespalten werden, siehe **Abb. 100** obere Zeile. Die ursprüngliche Zeitreihe ist in blau dargestellt und das Ergebnis des Wavelet-Denoising in rot. In der unteren Zeile sind die Differenzen zwischen diesen beiden Zeitreihen aufgetragen.

Da sich in diesem Beispiel der Signalanteil lediglich im niedrigen Frequenzbereich unterhalb von 2 Hz abbildet, siehe **Abb. 99** mittleres Diagramm, wohingegen das Messrauschen in allen Frequenzbereichen auftritt, kann die Aufspaltung der Zeitreihe in ihren Signalanteil und das Messrauschen optimal mit der Wavelet-Transformation realisiert werden.

In den Residuen zwischen der ursprünglichen und der entrauschten Zeitreihe sind keine systematischen Anteile erkennbar und die Standardabweichung der Residuen liegt mit 0,13 mm in der gleichen Größenordnung wie die der Ausschnitte der Zeitreihe in Ruhe. Dementsprechend kann davon ausgegangen werden, dass die Residuen lediglich Rauschanteile beinhalten und somit keine Signalanteile aus der Zeitreihe der z-Koordinate während der Zugüberfahrt entfernt werden.



**Abb. 100.:** oben: Überlagerung der ursprünglichen Zeitreihe aus **Abb. 98** und der entrauschten Zeitreihe.  
unten: Residuen zwischen diesen beiden Zeitreihen.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine in situ Unsicherheitsbestimmung durch den kombinierten Ansatz im Zeit- bzw. Waveletbereich möglich ist, auch wenn sich das Tragwerk nicht hinreichend in Ruhe befindet. Durch die Eigenschaften der Wavelet-Transformation kann darüber hinaus auch die Trennung von Signal- und Rauschteilen realisiert werden. Somit kann durch die zeitliche Auflösung des Profilschanners direkt ein realitätsnahes Unsicherheitsmaß bestimmt werden, ohne auf Laboruntersuchungen zurückgreifen zu müssen.

#### 4.1.3 Vergleich mit einem induktiven Wegaufnehmer

Ein klassischer Sensor, der typischerweise zur Bestimmung der Vertikalverformung von Tragwerken verwendet wird, ist der induktive Wegaufnehmer, siehe **Abb. 101.a**. Er wird zur Messung des relativen Abstandes zwischen Messobjekt und Bezugspunkt oder der Bestimmung von Längenänderungen eingesetzt. Dies erfolgt mittels eines berührenden Verfahrens, bei dem die Eintauchtiefe des mit dem Messobjekt verbundenen Tauchankers in einer Magnetspule bestimmt wird. Dementsprechend handelt es sich um einen hochpräzisen, an einem diskreten Punkt messenden Sensor. Aufgrund ihrer Genauigkeit werden die induktiven Wegaufnehmer im Folgenden als Referenzsensoren für eine diskrete Position des Tragwerks der Brücke betrachtet.

Durch den Vergleich mit den Ergebnissen der induktiven Wegaufnehmer soll die Eignung des Profilschanners zur Überwachung von Tragwerken aufgezeigt werden. Die für den Vergleich verwendeten induktiven Wegaufnehmer sind rückgeführt und besitzen eine Linearitätsabweichung kleiner  $\pm 0,2 \%$  des Nennmessweges.

Die eigentliche Messung der induktiven Wegaufnehmer findet dabei an einem sich mit der Brücke mitbewegenden Gewicht statt. Dazu wird an der Brücke eine Verbindungsstange mittels Magnethalterung befestigt, siehe **Abb. 101.a** links, an der das Gewicht befestigt ist. Dieses hängt in einer horizontalen Röhre, um eine Pendelbewegung zu verhindern, siehe **Abb. 101.a** rechts. Auf dem Gewicht setzt der eigentliche Wegaufnehmer auf, wobei seine Halterung davon entkoppelt ist. Gemessen wird die Bewegung des Gewichtes und damit auch die Verformung des Hauptträgers der Brücke.

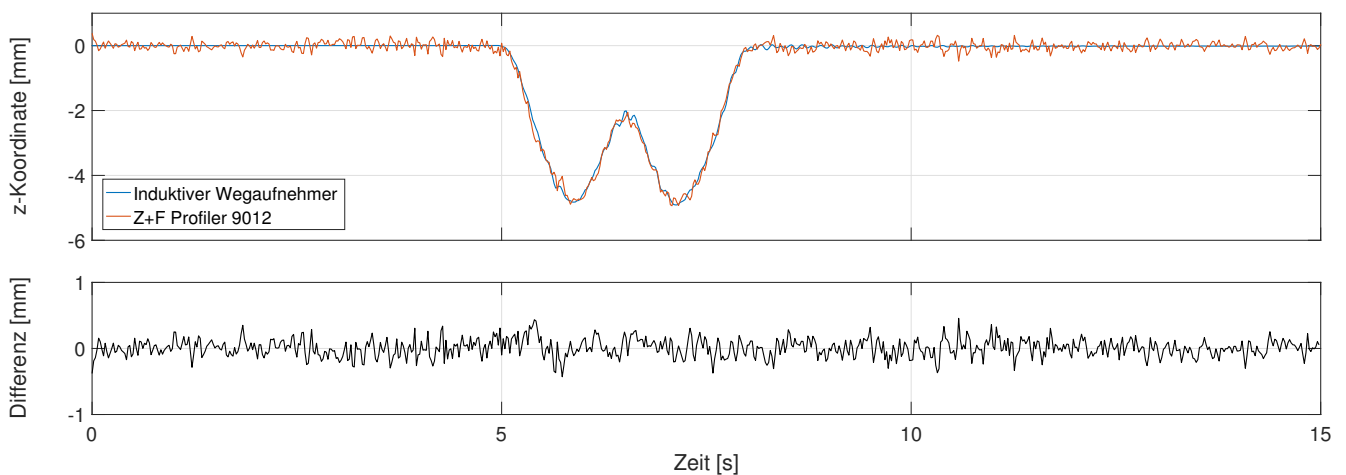
Der Vergleich der Profilschannermessungen mit den Messungen des induktiven Wegaufnehmers kann aufgrund der an der Brücke befestigten Magnethalterung nicht exakt an derselben Messstelle stattfinden. Daher wird das nächstliegende Segment mit dem geringsten horizontalen Abstand zur Wegaufnehmerhalterung für den Vergleich verwendet. Bei diesem handelt es sich wiederum um das in **Abb. 96.a** türkis



**Abb. 101.a.:** links: Befestigung der Verbindungsstange an der Brücke; rechts: Verankerung im Boden mit Gewicht und aufgesetztem Wegaufnehmer.

eingefärbte Segment, das einen horizontalen Abstand von ca. 150 mm besitzt und im Folgenden erneut, als eine Klasse betrachtet wird.

In **Abb. 101.b** sind im oberen Diagramm die beiden Zeitreihen des induktiven Wegaufnehmers und des Klassenrepräsentanten der türkisfarbenen Klasse während der Zugüberfahrt dargestellt. Das untere Diagramm zeigt die Differenzen der beiden Zeitreihen.



**Abb. 101.b.:** oben: Zeitreihen der Messung des induktiven Wegaufnehmers und der z-Koordinate des Klassenrepräsentanten während einer Zugüberfahrt. Die Synchronisation wurde mittels Kreuzkorrelation durchgeführt. unten: Differenzen zwischen den beiden Zeitreihen.

In den Differenzen zwischen den beiden Zeitreihen lassen sich keine systematischen Effekte erkennen. Die Differenzen mit einer Standardabweichung von ca. 0,13 mm sind zufällig verteilt und entsprechen in ihrer Größenordnung dem Messrauschen des Profilerscanners, entsprechend Abschnitt 4.1.2.

Darüber hinaus ist erkennbar, dass die hier vorliegende räumliche Trennung der Auswertestellen im Rahmen der Messgenauigkeit keine signifikante systematische Auswirkung auf das Ergebnis hat.



Insgesamt betrachtet kann aus diesem Vergleich mit einem etablierten Sensor der Baumesstechnik geschlossen werden, dass der Profilschanner zur Überwachung von Tragwerken geeignet ist und dabei mit deutlich geringerem Mess- und Instrumentierungsaufwand vergleichbare Ergebnisse liefern kann. Ähnliche Ergebnisse liefert auch der Vergleich mit dem in **Abb. 95** sichtbaren terrestrischen Mikrowelleninterferometer, siehe [Bec+16].

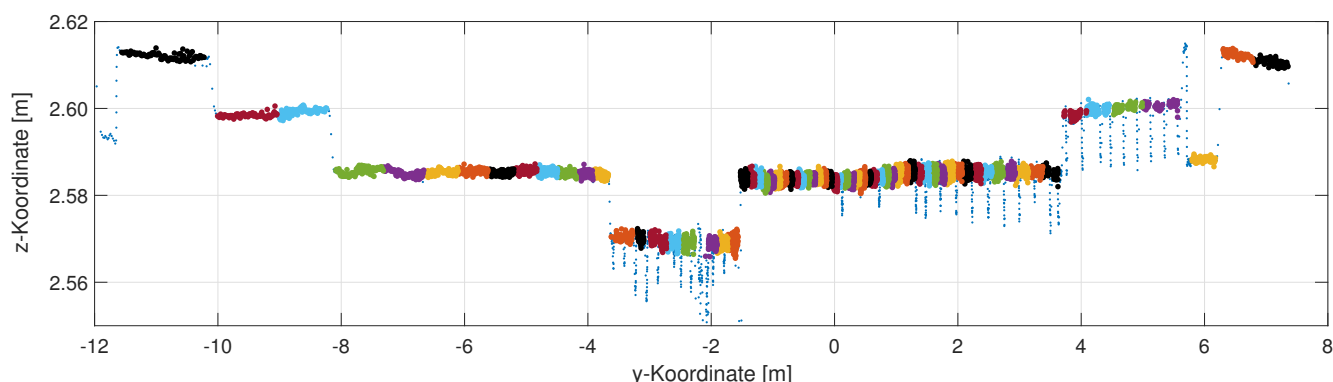
Bei dem vorgestellten Vergleich der beiden Sensoren wird durch die ausschließliche Betrachtung der zeitlichen Auflösung des approximierten Tragwerkspunktes lediglich ein Bruchteil der gesamten Profilmessinformation ausgewertet. Im folgenden Abschnitt soll durch die Erweiterung der Betrachtungsweise auf das gesamte Tragwerksprofil das Potenzial der raumzeitlichen Analyse von Tragwerken mittels Profilschanning aufgezeigt werden.

#### 4.1.4 Raumzeitliche Bestimmung der Vertikalverformung

In Kapitel 3 wird der Ablauf der raumzeitlichen Prozessierung vorgestellt. Die Anwendung der automatischen Analyse von Messprofilen am Beispiel der hier vorgestellten Brücke wird in Abschnitt 4.1.1 erläutert und deren Ergebnisse präsentiert. In den daran anschließenden Analysen wird zur Veranschaulichung der Unsicherheitsbestimmung bzw. für den Vergleich mit einem induktiven Wegaufnehmer jedoch lediglich die Information eines approximierten Tragwerkspunktes in Form des Klassenrepräsentanten ausgewertet. Dabei wird entsprechend den klassischen Sensoren der Brückenmesstechnik nur die zeitliche Auflösung betrachtet.

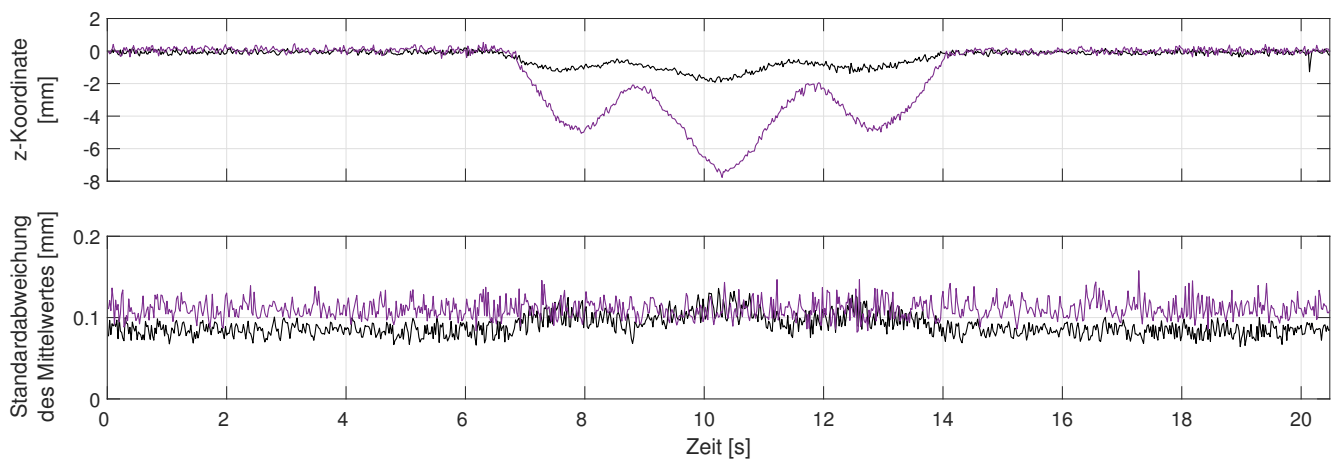
In den folgenden Analysen wird zusätzlich zur zeitlichen auch die räumliche Auflösung in die Auswertung miteinbezogen. Bei den dafür verwendeten Ergebnissen der automatischen Analyse (siehe **Abb. 96.a** und **Abb. 96.b**) handelt es sich um sogenannte Tragwerkssegmente, die für die raumzeitliche Bestimmung der Vertikalverformung weiter unterteilt werden müssen.

Die Festlegung der Klassengrößen wird über gleiche Winkelbereiche realisiert. Somit entstehen in diesem Fall 71 Klassen, die in **Abb. 102** farbig hervorgehoben sind. Die räumliche Ausdehnung der Klassen variiert dabei zwischen 0,1 m und 1,4 m, wobei die Anzahl der beinhalteten Messpunkte nahezu konstant ist. Dies bietet den Vorteil, dass die Messdauer für alle Klassen ungefähr gleich lang ist und somit auch die Unsicherheit aufgrund der sequenziellen Messung die gleiche Größenordnung besitzt, entsprechend Abschnitt 3.2.1.



**Abb. 102.:** Räumliche Klassenbildung basierend auf der automatischen Segmentierung aus **Abb. 96.b**.

Zur Verifizierung der Wahl der Klassengröße werden im Folgenden zunächst zwei Klassen näher betrachtet, und zwar die Klasse mit der maximalen Ausdehnung von 1,4 m (schwarz, y-Koordinate: -11 m) und die Klasse mit der maximalen Verformungsamplitude (lila, y-Koordinate: -2 m), siehe **Abb. 103**.



**Abb. 103.:** oben: Zeitreihen der z-Koordinate der beiden Klassenrepräsentanten. unten: Zeitreihen der profilweise bestimmten Standardabweichung der Klassenrepräsentanten.

Im oberen Diagramm sind die Zeitreihen der z-Koordinate der beiden Klassenrepräsentanten dargestellt und im unteren Diagramm die profilweise bestimmte Standardabweichung des Mittelwertes. Für die lilafarbene Klasse zeigt sich trotz der Bewegung des Tragwerkes keine systematische Verfälschung der profilweise bestimmten Standardabweichung. Im Gegensatz dazu treten bei der schwarzen Klasse erste Anzeichen von systematischen Effekten während der Überfahrt auf. Die Klassenausdehnung von 1,4 m stellt somit für die Kombination aus Tragwerk und Bewegungsgeschwindigkeit das Maximum dar, da ansonsten kein quasistatisches Klassenverhalten mehr vorausgesetzt werden kann, siehe Abschnitt 3.2.1.

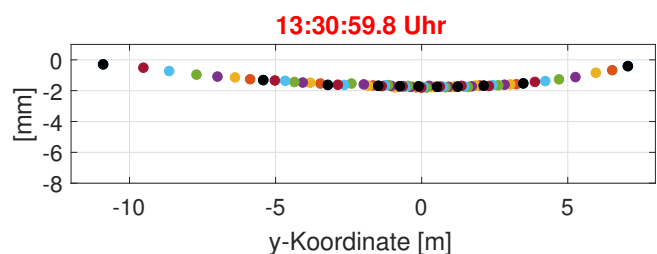
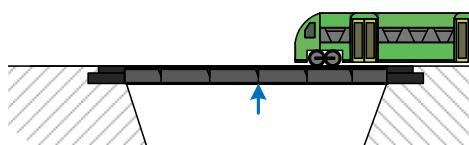
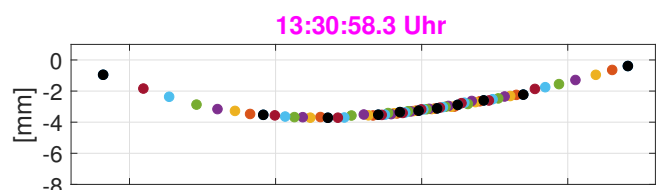
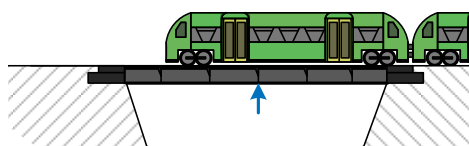
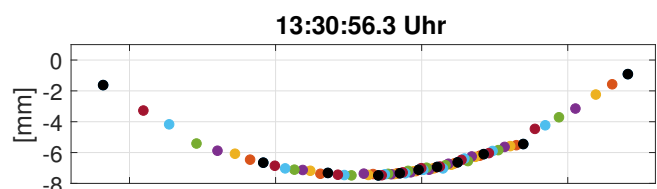
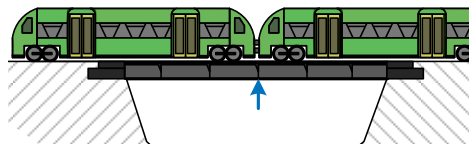
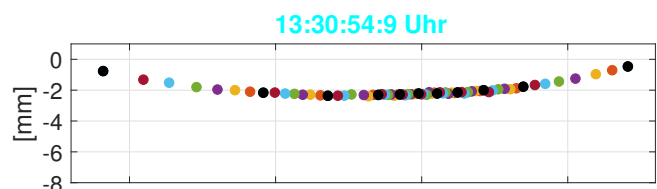
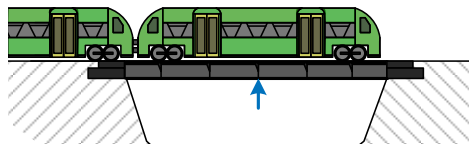
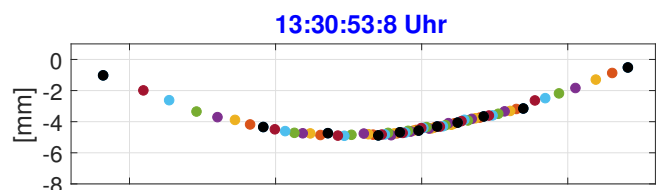
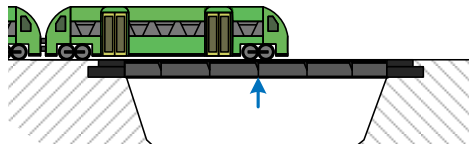
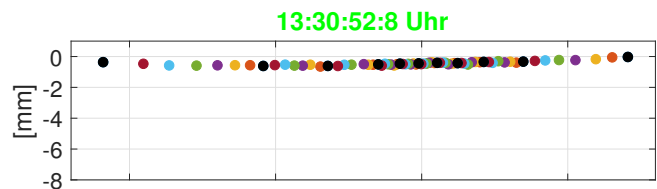
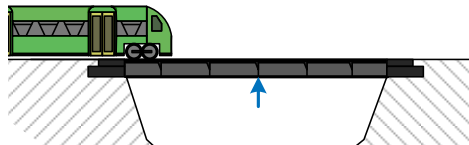
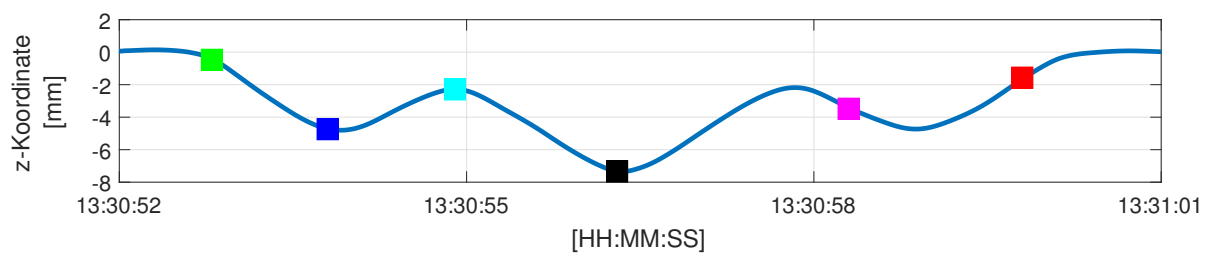
Durch die Prozessierung der dargestellten räumlich verteilten Klassen wird der Übergang zu einer raumzeitlichen Darstellung geschaffen, siehe **Abb. 104**. Im obersten Diagramm ist zunächst die Zeitreihe eines Klassenrepräsentanten in der Mitte des Tragwerkes dargestellt.

Darunter sind auf der rechten Seite sechs Epochen der raumzeitlichen Darstellung gezeigt. Auf der linken Seite ist dazu jeweils die entsprechende Position des Zuges auf der Brücke dargestellt. Die Position, an der die Zeitreihe im obersten Diagramm ausgewertet wurde, ist zusätzlich mit einem blauen Pfeil markiert. Die Zuordnung der Klassenrepräsentanten innerhalb der Epochen der raumzeitlichen Darstellung (rechte Seite) zur Brückenstruktur in **Abb. 102** ist anhand der konsistenten Farbgebung der Klassen und ihrer Repräsentanten möglich. Die zeitliche Zuordnung der sechs räumlichen Darstellungen kann über die Uhrzeit bzw. die entsprechende Farbgebung der Markierungen im obersten Diagramm erfolgen.

In Kombination mit den skizzierten Zugpositionen soll anhand des obersten Diagramms zunächst der allgemeine Ablauf der Zugüberfahrt veranschaulicht werden:

Die Last der Waggons verteilt sich jeweils auf seine beiden Drehgestelle, sodass bei dem hier gezeigten Doppelwagen vier Auflastpunkte existieren, von denen die mittleren beiden so nahe beieinanderliegen, dass diese beiden zusammengefasst werden können. In den folgenden Betrachtungen wird deshalb von drei Auflastpunkten mit unterschiedlichen Lasten ausgegangen. Da der Abstand der Drehgestelle mit 17 m fast so groß ist wie die Spannweite der Hauptträger mit 19,6 m, befindet sich meist nur ein Auflastpunkt zeitgleich auf der Brücke.

Dementsprechend weist die Zeitreihe der z-Koordinate des Klassenrepräsentanten im oberen Diagramm in **Abb. 104** drei lokale Minima auf. Die maximale Durchbiegung (mittleres Minimum) entsteht, wenn sich das hintere Drehgestell des ersten Waggons zusammen mit dem vorderen Drehgestell des zweiten Waggons auf der Brücke befindet (mittlerer Auflastpunkt). Die beiden anderen lokalen Minima werden durch die weiteren Drehgestelle des vorderen bzw. hinteren Waggons verursacht.



**Abb. 104.:** Raumzeitliche Darstellung einer Zugüberfahrt mit zwei Waggonen. oberstes Diagramm: Zeitreihe eines Klassenrepräsentanten zur Einordnung der einzelnen Epochen der raumzeitlichen Darstellung. Die restlichen sechs Abbildungen entsprechen jeweils der räumlichen Darstellung eines definierten Zeitpunktes während der Überfahrt (Epochen). Die zeitliche Zuordnung kann über die Markierungen in der obersten Zeile stattfinden.



---

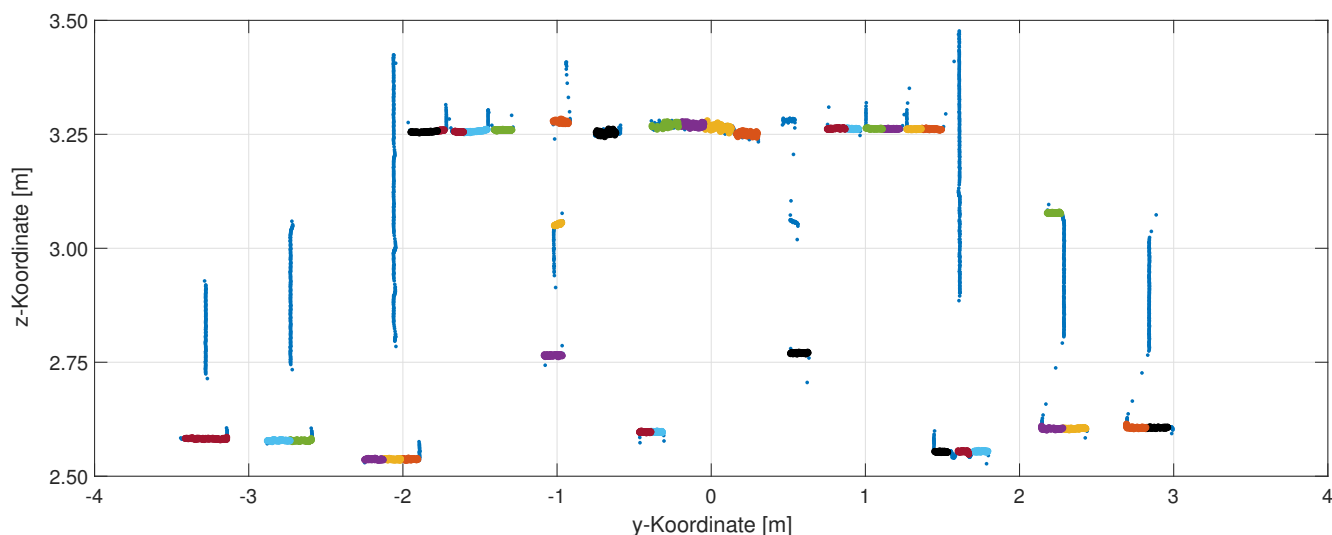
In den sechs dargestellten Epochen sind die relativen Änderungen der Brückenform abgebildet. Dabei zeigt sich, dass die Biegelinie wie erwartet je nach Position der Drehgestelle der Waggons auf der Brücke eine andere Form annimmt:

- Die grüne Epoche zeigt die Situation kurz, nachdem das vordere Drehgestell des ersten Waggons auf die Brücke gefahren ist. Die Amplitude der Biegelinie ist gering und die Form ist entsprechend der Zugposition asymmetrisch.
- Zum Zeitpunkt der blauen Epoche befindet sich das erste Drehgestell des ersten Waggons direkt in der Mitte der Brücke, wodurch zu diesem Zeitpunkt das erste lokale Minimum auftritt. Die Form der Biegelinie ist symmetrisch um die Brückenmitte mit einer maximalen Amplitude von 5 mm.
- In der türkisfarbenen Epoche ist die erste partielle Entlastung der Brücke dargestellt. Der erste und zweite Auflastpunkt befindet sich symmetrisch zur Mitte der Brücke an den beiden Brückenrändern, wodurch ebenfalls eine symmetrische Biegelinie entsteht, die durch zwei Auflastpunkte gekennzeichnet ist. Über einen Gesamtbereich von etwa 9 m wird eine nahezu konstante Durchbiegung von 2 mm erreicht.
- Die schwarze Epoche zeigt die maximale Belastung der Brücke durch den mittleren Auflastpunkt (zwei Drehgestelle). Die maximale Durchbiegung von nahezu 8 mm tritt in der Mitte der Brücke auf. Die Lastsituation entspricht der blauen Epoche jedoch mit einer höheren Belastung. Im Bereich der y-Koordinate von 3,5 m weisen einige Klassenrepräsentanten eine größere Durchbiegung auf als für eine homogene Biegelinie zu erwarten wäre. Dabei handelt es sich um den Randbereich des vierten Tragwerkssegments von rechts, vergleiche dazu **Abb. 102**.
- Die magentafarbene Epoche zeigt eine sehr asymmetrische Biegelinie, da während der Doppelauf-lastpunkt gerade die Brücke verlässt, sich das letzte Drehgestell noch nicht in der Mitte der Brücke befindet.
- Der Zeitpunkt der roten Epoche zeigt die Situation, kurz bevor das letzte Drehgestell die Brücke verlässt. Die Form der Biegelinie entspricht in etwa einer gespiegelten Version der grünen Epoche.

Die raumzeitliche Prozessierung ermöglicht die Erfassung der gesamten Oberflächenstruktur innerhalb eines Profils. Es wird die direkte Messung der Biegelinie ermöglicht, aber auch die Aufdeckung von abweichendem Verhalten einzelner Profilausschnitte.

Ergänzend zu der raumzeitlichen Darstellung der Konfiguration 2 soll im Anschluss die Konfiguration 3 (Querprofil) näher betrachtet werden. Durch die Lage der Brücke in einer leichten Kurve erfährt der kurvenäußere Hauptträger (Hauptträger 1) eine größere Belastung und somit auch eine größere Verformung.

In **Abb. 106** ist die räumliche Klassenbildung des Tragwerkprofils der Konfiguration 3 gezeigt. Diese basiert auf den Ergebnissen der automatischen Analyse des Messprofils und der dabei durchgeführten Segmentierung, siehe **Abb. 97**. Auch hier werden die Klassen über gleiche Winkelbereiche innerhalb der jeweiligen Segmente definiert, wodurch in diesem Fall 35 Klassen entstehen.

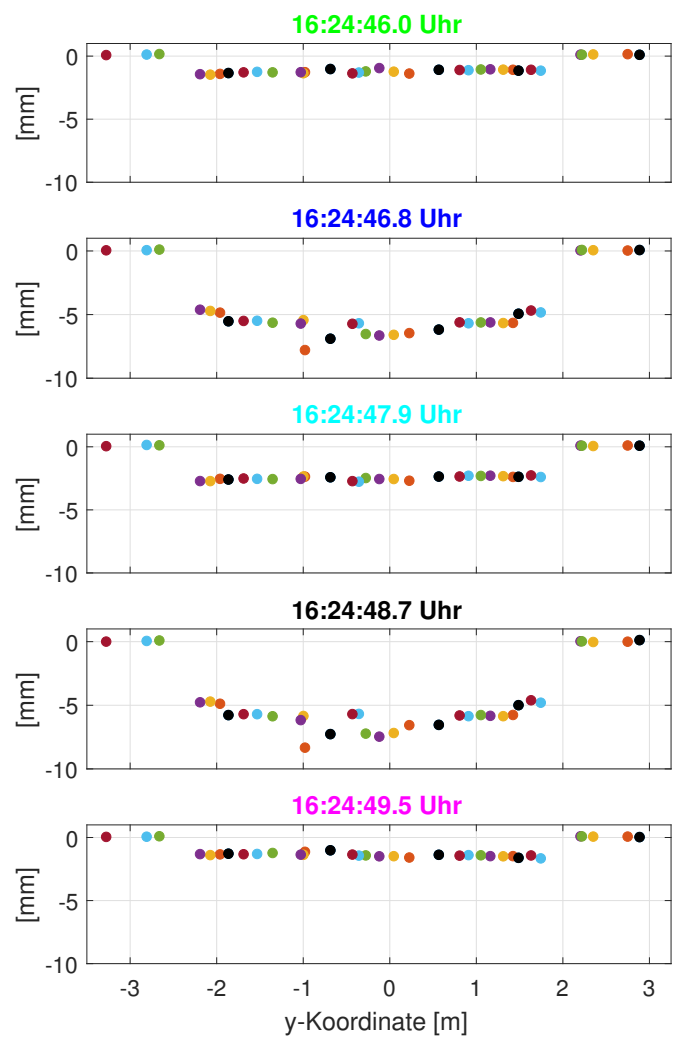
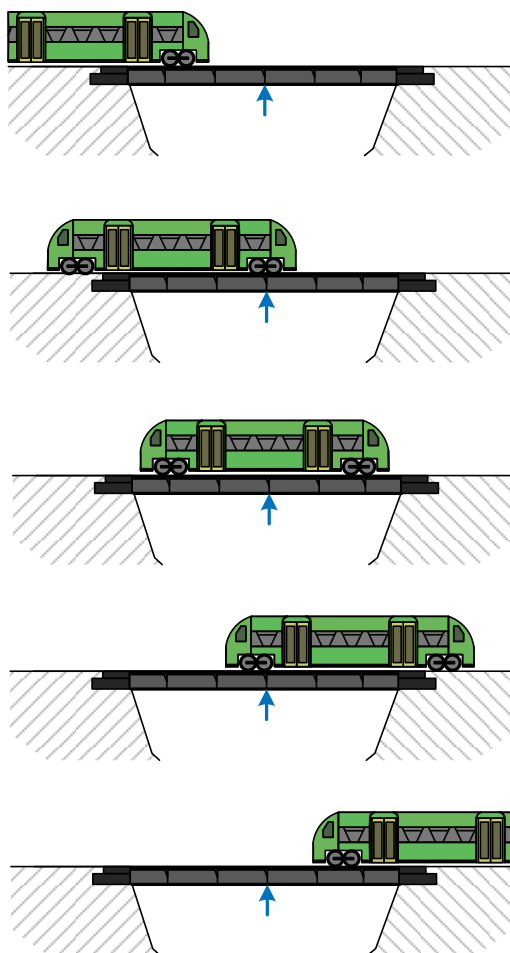
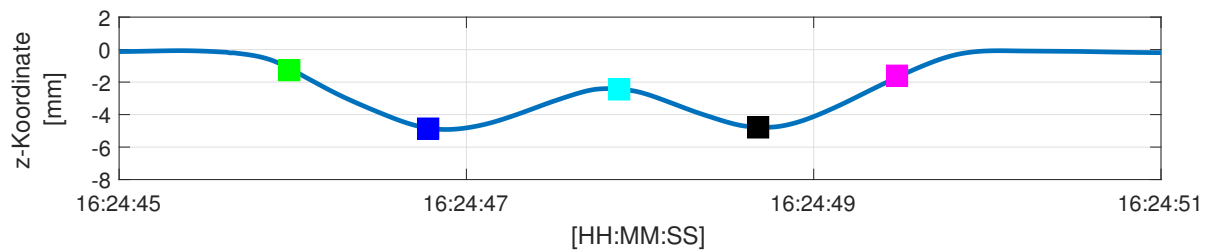


**Abb. 106.:** Räumliche Klassenbildung basierend auf der automatischen Segmentierung aus **Abb. 97**.

In **Abb. 107** ist die epochenweise raumzeitliche Darstellung zu sehen. Das Auswerte- und Darstellungsschema wird für die Auswertung der Querprofilmessung beibehalten, somit ist die Zuordnung der Klassenrepräsentanten in **Abb. 107** zu den Klassen in **Abb. 106** über das Farbschema möglich. Auch im obersten Diagramm von **Abb. 107** ist die Zeitreihe eines Klassenrepräsentanten in der Mitte des Tragwerks dargestellt, wodurch die zeitliche Zuordnung der darunter abgebildeten fünf räumlichen Darstellungen entsprechend den Markierungen ermöglicht wird.

In der Darstellung in **Abb. 107** kann zunächst die bauliche Unabhängigkeit der Fußwege erkannt werden. In allen fünf Epochen zeigen die äußeren Klassenrepräsentanten, die den Fußwegen zugeordnet sind, keine signifikante Deformation auf, obwohl alle anderen Bauteile eine Verformung von mehreren Millimetern aufweisen.

Die unterschiedliche Durchbiegung der beiden Hauptträger aufgrund der Kurvenlage ist in den Diagrammen nur schwer zu erkennen, da es sich bei dieser lediglich um Differenzen von maximal 0,2 mm handelt. Deutlich erkennbar sind hingegen die unterschiedlichen Durchbiegungen anderer Bauteile der Brücke, die eindeutig eine stärkere Belastung auf der linken Seite der Brücke zeigen. Dieser Effekt ist insbesondere bei den maximalen Durchbiegungen in der blauen und schwarzen Epoche zu sehen. Der Vergleich der Klassenrepräsentanten im y-Koordinatenbereich von -1 m bis 0 m zu den Klassenrepräsentanten im Bereich von 0 m bis 1 m macht dies deutlich.



**Abb. 107.:** Raumzeitliche Darstellung einer Zugüberfahrt mit einem Waggon. Die Darstellung entspricht Abb. 104.

---

Um die Möglichkeiten des Profilsanners noch einmal zu verdeutlichen, kann der Vergleich mit den induktiven Wegaufnehmern erneut aufgenommen werden. Prinzipiell können die 71 Klassenrepräsentanten des Längsprofils bzw. die 35 Klassenrepräsentanten des Querprofils als virtuelle Wegaufnehmer angesehen werden, die zwar einzeln nicht an die Genauigkeit eines realen induktiven Wegaufnehmers herankommen, in ihrer Summe jedoch eine deutlich bessere Erfassung der Gesamtstruktur ermöglichen als eine einzelne diskrete Messstelle.

Dabei können für anschließende Analysen zusätzlich zur direkten Messung der Biegelinie auch gezielt Tragwerkspositionen ausgewählt werden. Da sämtliche Informationen auch im Nachhinein aus den Messdaten extrahiert werden können, muss somit bei der Planung weniger Vorinformation über das Tragwerk vorhanden sein.

Die Profilsannermessungen können darüber hinaus auch zur Generierung von Vorinformationen für z. B. größere Messkampagnen verwendet werden, insbesondere in der Konfiguration 3. Durch die automatische Auswertung von Messprofilen zur raumzeitlichen Darstellung, die auch zur Animation der Bewegungsabläufe genutzt werden kann, bietet sich eine solche Messung u. a. für eine erste Untersuchung der Tragwerksstruktur an.

Mit wenig Aufwand kann so eine detaillierte Aufbereitung der Struktur der Tragwerksoberfläche erzeugt, einzelne Bauteile auf ein atypisches Verformungsverhalten analysiert und durch die Generierung von Vorinformationen die Messplanung optimiert werden. Durch die Möglichkeit der getrennten Analyse des Verformungsverhaltens aller im Querprofil enthaltenen Bauteile kann darüber hinaus die Positionierung von klassischen Sensoren der Brückenmesstechnik optimiert werden.

---

#### 4.1.5 Bestimmung der Horizontalverformung der Hauptträger

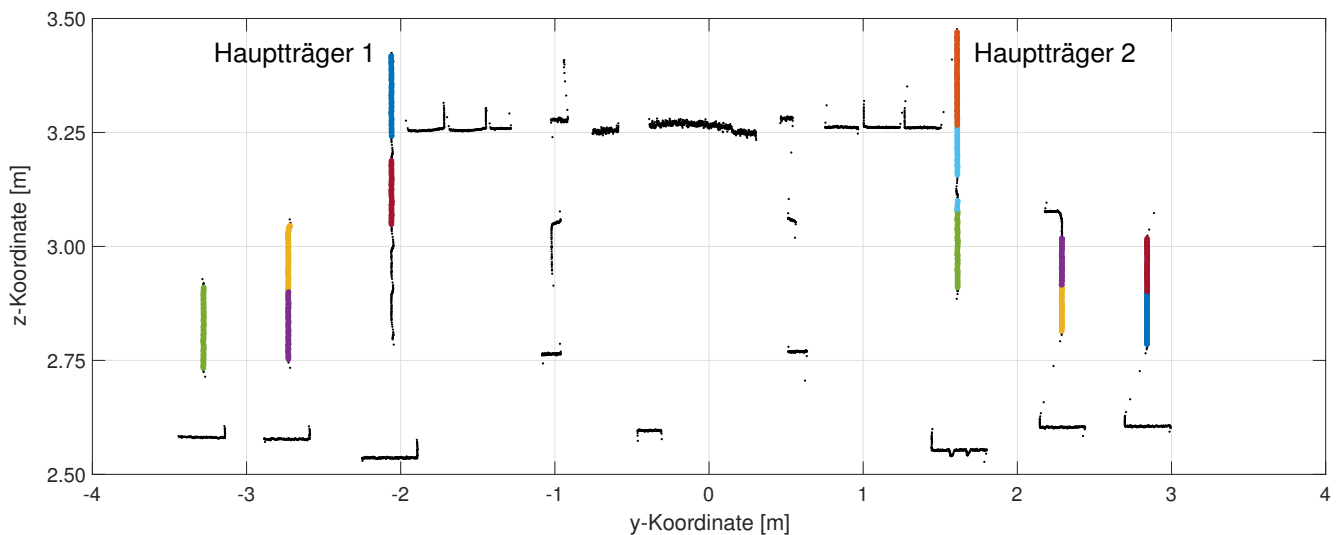
---

Zusätzlich zu den in den vorangegangenen Analysen gezeigten Auswertungen der Vertikalkomponente kann insbesondere mit der Messung der Konfiguration 3 auch die Horizontalverformung der Brücke erfasst werden. Die folgenden Ausführungen befassen sich daher weiter mit der Auswertung dieser Konfiguration, die quer zur Brückenachse auf Höhe der induktiven Wegaufnehmer gemessen wurde. Dabei steht die simultane Erfassung der Horizontalverformung beider Hauptträger im Mittelpunkt.

Durch die Kurvenlage der Brücke kommt es neben der zuvor aufgezeigten größeren Verformung der kurvenäußeren Bauteile auch zu einer horizontalen Verformung der Hauptträger. Diese entsteht durch die Kombination aus der Kurvenlage der Brücke und dem Sinuslauf des Zuges.

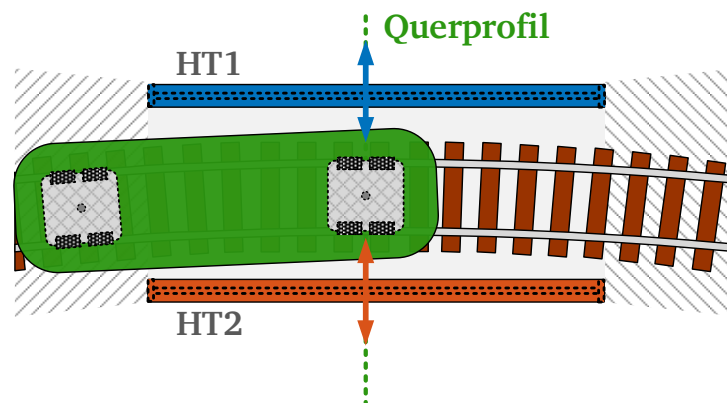
Um die Horizontalverformung bestimmen zu können, wird zunächst eine erneute automatische Analyse der Messprofile durchgeführt, wobei in diesem Fall die y-Koordinatenwerte analysiert werden. Aufbauend auf der dabei durchgeführten Segmentierung findet anschließend die räumliche Klassenbildung statt, deren Ergebnis in **Abb. 109.a** dargestellt ist. Auch hier findet die Klassendefinition über gleiche Winkelbereiche statt, sodass alle Klassen in etwa gleich viele Messpunkte beinhalten. Da in vertikaler Richtung hauptsächlich an den Hauptträgern und den Fußwegen „glatte“ Tragwerksbereiche vorliegen, konzentriert sich die Klassenbildung auf diese Bereiche. Insgesamt entstehen dadurch 12 Klassen, die zur Bestimmung der Horizontalverformung genutzt werden können und in **Abb. 109.a** farblich hervorgehoben sind.

Für die Analyse der Horizontalverformung der beiden Hauptträger werden die blaue Klasse am Hauptträger 1 und die orangefarbene Klasse am Hauptträger 2 als repräsentative Beispiele ausgewählt. Beide Klassen haben eine vertikale Ausdehnung von ca. 0,15 m und beinhalten etwa 80 Punkte.



**Abb. 109.a.:** Räumliche Klassenbildung auf Basis eines automatisch segmentierten Profils in Querrichtung auf Höhe der Referenzsensoren (Konfiguration 3).

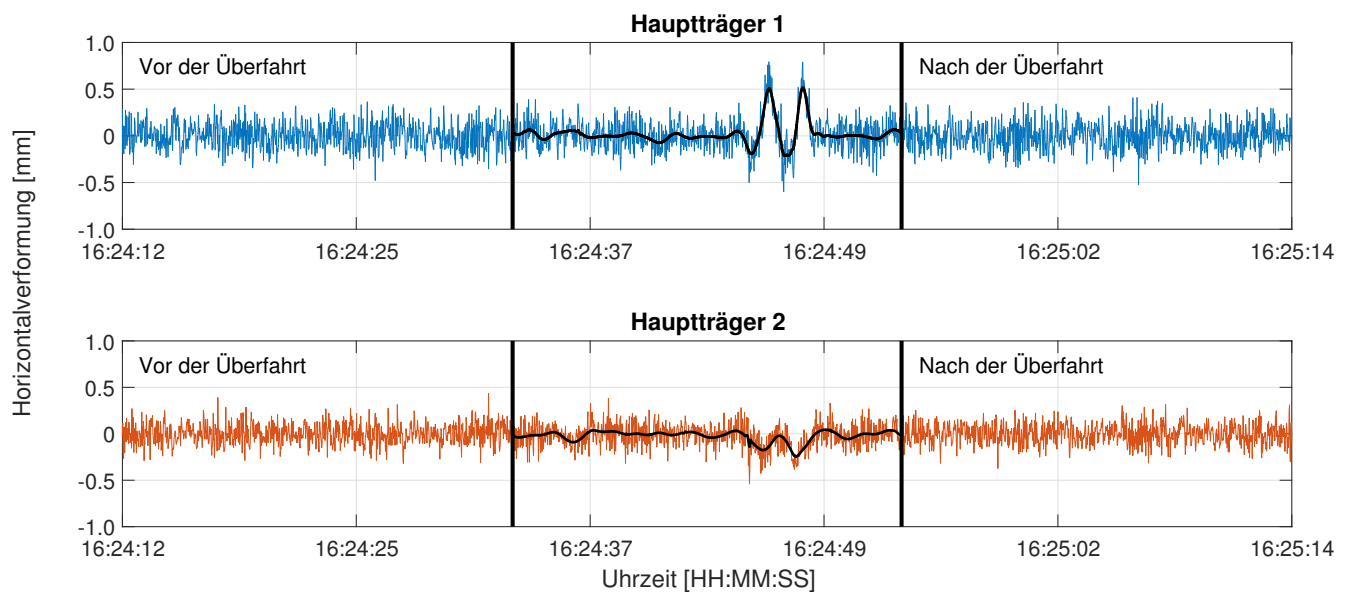
In **Abb. 109.b** ist zunächst eine schematische Grundrissdarstellung der Situation während einer Zugüberfahrt dargestellt. Neben der Kurvenlage der Brücke sind auch die beiden Drehgestelle des Zuges eingezeichnet. In der Darstellung befindet sich das erste Drehgestell auf Höhe der Profilmessung. Zur Vereinfachung der Zuordnung ist die farbliche Darstellung der beiden Hauptträger entsprechend der Klassenfarbe gewählt. Dies wird auch in **Abb. 110** beibehalten.



**Abb. 109.b.:** Grundrissdarstellung der Brücke während einer Zugüberfahrt. Die Farbgebung der beiden Hauptträger (HT1 und HT2) entspricht den Zeitreihen aus **Abb. 110**.

In **Abb. 110** sind die Zeitreihen der Klassenrepräsentanten der beiden Klassen dargestellt. Diese gliedern sich jeweils in drei Teile: vor der Überfahrt, während der Überfahrt und nach der Überfahrt, welche durch schwarze Linien visuell voneinander getrennt sind.

Aus den Ausschnitten vor und nach der Überfahrt (ohne Belastung) kann im Zeitbereich die Unsicherheit für die y-Koordinate der beiden Klassenrepräsentanten bestimmt werden. Für die blaue Zeitreihe ergibt sich eine Standardabweichung von ca. 0,13 mm und für die orangefarbene Zeitreihe von ca. 0,11 mm. Für die Ausschnitte während der Überfahrt können entsprechend Abschnitt 3.3.4 die Unsicherheiten im Waveletbereich berechnet werden. Die so bestimmten Unsicherheiten decken sich mit den Ergebnissen der Ausschnitte in Ruhe auf wenige hundertstel Millimeter.



**Abb. 110.:** Zeitreihen der Klassenrepräsentanten der blauen (HT1) und orangefarbenen (HT2) Klasse.

Unter Verwendung dieser Ergebnisse wird der Ausschnitt während der Überfahrt mittels Wavelet-Denoising entrauscht und das Ergebnis in schwarz der eigentlichen Zeitreihe überlagert.

In beiden Zeitreihen lässt sich die Horizontalverformung aufgrund der einwirkenden Kräfte der Drehgestelle des Zuges nachweisen. Der Hauptträger 1 (Kurvenaußenseite) weist bei der Überfahrt beider Drehgestelle eine maximale horizontale Verformung von über 0,5 mm auf. Beim Hauptträger 2 liegt die Größenordnung der Horizontalverformung dagegen nur knapp über dem Rauschniveau. Dies zeigt, dass aufgrund der Kurvenlage der Großteil der horizontalen Last auf dem kurvenäußeren Gleis aufliegt.

Durch die kombinierte Auswertung der Vertikal- und Horizontalverformung des Brückentragwerkes bieten so insbesondere Messungen in der Konfiguration 3 das Potenzial Vorinformationen über das Tragwerksverhalten zu erfassen, um diese in die Planung größerer Messkampagnen miteinzubeziehen. Es kann z. B. analysiert werden ob die Querverformung der Brücke die Ergebnisse weiterer Messsensorik verfälscht bzw. es können diese Messungen verifiziert und korrigiert werden, siehe z. B. [Bec+16].



---

## 4.2 Belastungsversuch am Bogen einer historischen Gewölbebrücke über die Aller

---

Bei dem Untersuchungsobjekt handelt es sich um einen Bogen der über 150 Jahre alten Eisenbahnbrücke über die Aller bei Verden auf der Strecke von Wunstorf nach Bremerhaven (Strecke 1740, Kilometer 84,9). Die Gewölbebrücke wurde 2015 durch eine stählerne Trogbrücke (siehe Abschnitt 4.4) ersetzt. Die aus Ziegelmauerwerk gefertigte historische Brücke besitzt kreisförmige Bögen mit einer lichten Weite von ca. 14 m und einer Bogenbreite von ca. 8 m, siehe **Abb. 111.a** und **Abb. 111.b**.



**Abb. 111.a.:** Ansicht der Westseite des untersuchten Bogens im Ursprungszustand.

Unter der Federführung des Instituts für Massivbau der Leibniz Universität Hannover sollte vor dem Abbruch der Brücke dessen Tragfähigkeit experimentell ermittelt werden. Die Zielstellung des Belastungsversuchs bestand in der Verifikation der Qualität bestehender Rechenverfahren für Gewölbebrücken. Darüber hinaus sollte das Tragverhalten von Gewölbebrücken oberhalb des Gebrauchslastniveaus untersucht werden, um so insgesamt die Beurteilung historischer Gewölbebrücken bezüglich der Belastbarkeit und Lebensdauer zu verbessern, siehe [Sch+17].



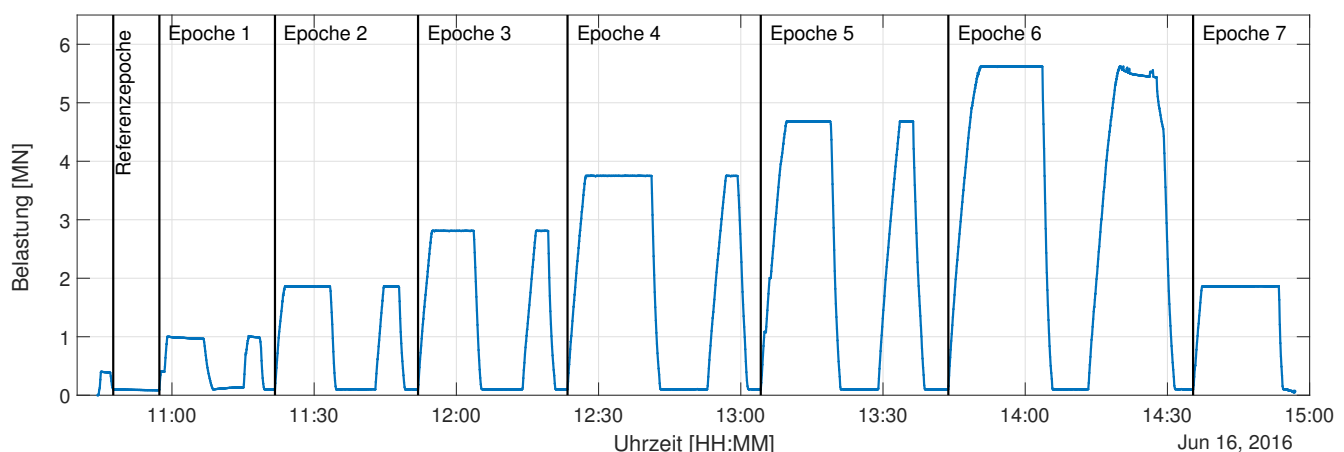
**Abb. 111.b.:** Ansicht der Ostseite des Brückenbogens während des Belastungsversuches. Die Verankerung der Hydraulikzylinder ist rot markiert.



Basierend auf numerischen Simulationen wurde zur Erzeugung von nichtlinearen Verformungen des Brückenbogens eine Belastung mit mindestens dem fünffachen der Gebrauchslast von 1 MN berechnet. Die maximal eingebrachte Last wurde dementsprechend auf 5,6 MN (ca. 571 Tonnen) festgelegt und mithilfe von vier Hydraulikzylindern erzeugt. Diese wurden auf dem Brückenbogen installiert und sind zur Erzeugung einer Gegenkraft mit Gewindestangen und Verpresspfählen unterhalb der Brücke in einer Tiefe von bis zu 18 m im Untergrund verankert, siehe **Abb. 111.b**. Eine detaillierte Beschreibung des Tragwerkes sowie der Versuchsplanung findet sich in [Sch+17].

#### 4.2.1 Messdaten

Mithilfe der Hydraulikzylinder wurden sechs unterschiedliche Laststufen in insgesamt acht Epochen realisiert, siehe **Abb. 112**. In der Referenzepoche wurde der Brückenbogen mit einer Grundlast von 0,1 MN belastet, die bei allen folgenden Epochen beibehalten wurde. Darauf aufbauend folgten die eigentlichen sechs Laststufen, wobei die Belastung von 1 MN in der ersten Epoche, bis zu 5,6 MN in der sechsten Epoche gesteigert wurde. Zum Abschluss fand in der siebten Epoche eine 20-minütige Dauerbelastung mit ungefähr 2 MN statt.



**Abb. 112.:** Mit den Hydraulikzylindern erzeugtes Belastungsregime.

Aufgrund der Verankerung der Hydraulikzylinder im Untergrund unterhalb des Brückenbogens und der nahezu sechsfachen Belastung (im Vergleich zur Gebrauchslast) musste nicht nur mit einer geometrischen Veränderung des Untergrundes, sondern auch mit einem teilweisen Versagen der Brücke in Form von Rissen und Abplatzungen gerechnet werden.

Die Positionierung der Sensoren stellte daher einen Kompromiss aus Aufnahmegeometrie und Messsicherheit dar, da sich die Sensoren nicht unmittelbar unterhalb der Brücke befanden, jedoch innerhalb des möglichen Einflussbereiches der Deformation des Untergrundes, siehe **Abb. 111.b**.

Innerhalb der sechsten Laststufe lösten sich bei einer Belastung von 5,6 MN teilweise die Verpresspfähle bzw. Gewindestangen aus ihrer Verankerung im Untergrund. Die dadurch verursachte Deformation verfälschte die Profilschannermessungen in einer Größenordnung, sodass keine Korrektur mehr möglich war. Die Messungen der sechsten und siebten Epoche können dementsprechend nicht weiter verwendet werden.

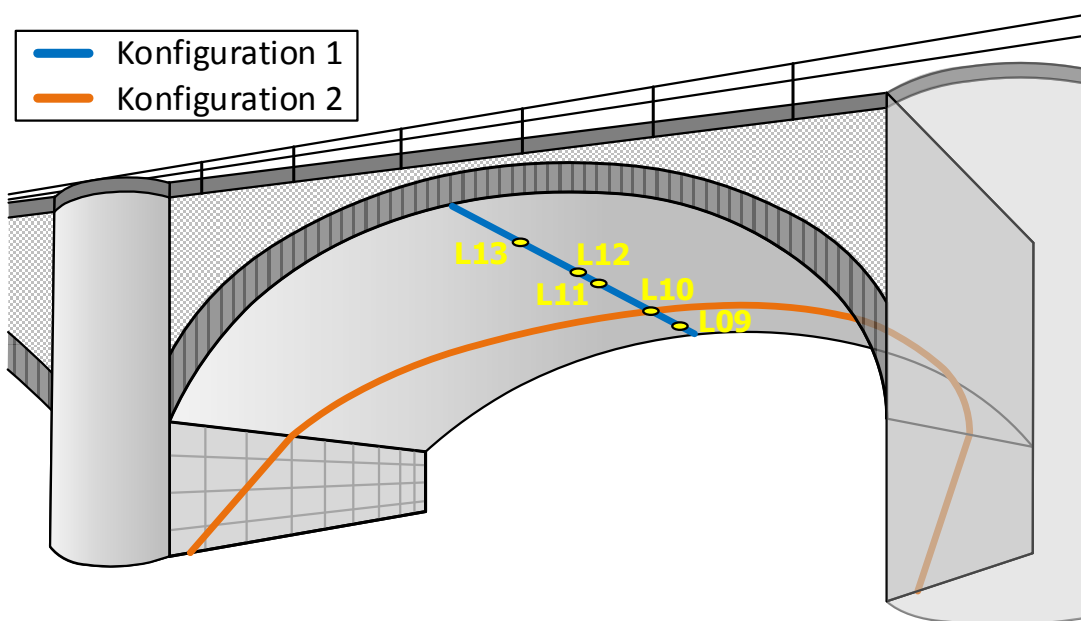
Der Belastungsversuch gliedert sich in zwei Versuchsreihen, die beide im Jahr 2016 durchgeführt wurden und bei denen aufgrund der interdisziplinären Ausrichtung eine Vielzahl an Messsystemen beteiligt war. Die folgenden Ausführungen konzentrieren sich ausschließlich auf die zweite Versuchsreihe im Juni 2016, bei der zusätzlich zum Profilschanner u. a. zwei 3D-TLS, siehe [Wuj+18] und [PS17], ein Lasertracker, ein terrestrisches Radar sowie induktive Wegaufnehmer zum Einsatz kamen. Eine ausführliche gemeinsame Veröffentlichung findet sich in [Aut18].

Der Ablauf dieser Versuchsreihe war dabei speziell auf den Einsatz von 3D-TLS ausgelegt. Da eine komplette Aufnahme in diesem Fall bis zu zehn Minuten dauert, sind die Epochen 1 bis 6 jeweils durch zwei Lasthaltephasen und zwei Phasen ohne Belastung gekennzeichnet, während denen das Tragwerk sich hinreichend in Ruhe befand, siehe **Abb. 112**. In diesen Phasen fanden die 3D-TLS- sowie die Laser-trackermessungen statt. Mit dem Profils Scanner wurden hingegen hauptsächlich die Lasteintrags- bzw. Entlastungsphasen beobachtet.

Konfiguration	Messrichtung	Epochen
1	im Scheitel quer zur Brückenlängsachse	1 bis 4
2	gekippt um 26 Grad in Brückenlängsachse	4 bis 5

**Tab. 113.:** Durchgeführte Messkonfigurationen, siehe auch **Abb. 113**.

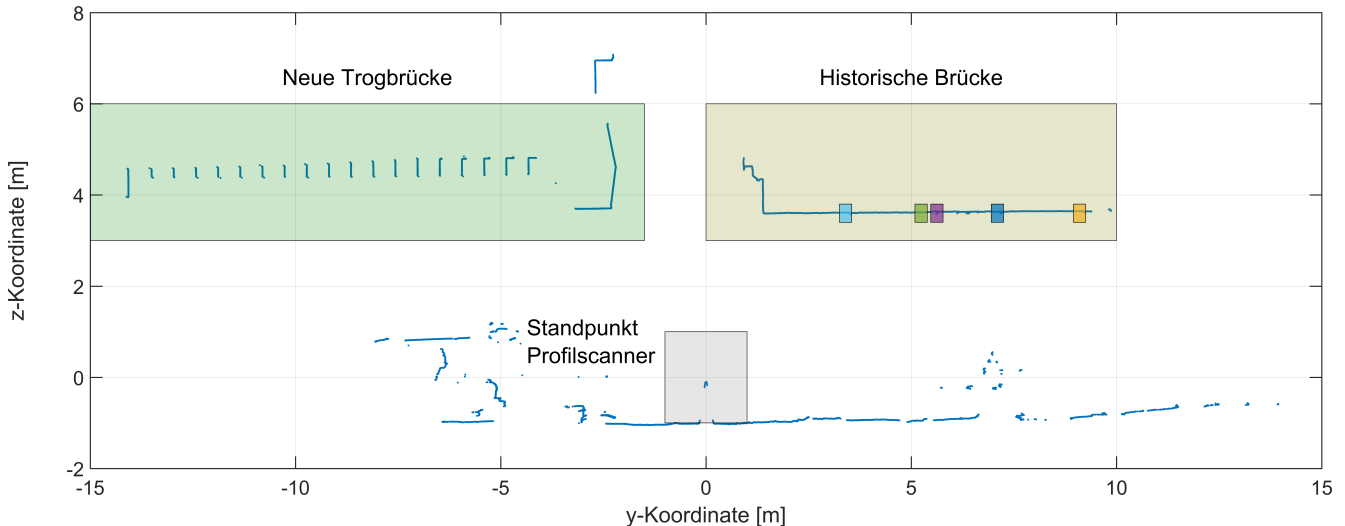
Aufgrund der Sensorpositionierung des Profils Scanners wurde für die Messungen der erweiterte Stativadapter verwendet, siehe **Abb. 10.a** und die Erläuterungen in Abschnitt 2.1.1. Mit der Möglichkeit, den Profils Scanner auch gekippt zu verwenden, wurden zwei Messkonfigurationen realisiert, siehe **Tab. 113** und **Abb. 113**.



**Abb. 113.:** Brückenbogen mit eingezeichneten Messachsen der beiden Konfigurationen.

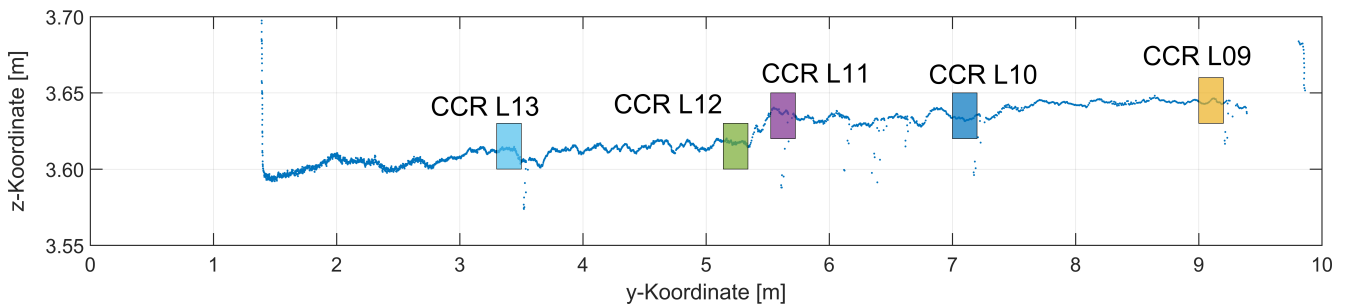
#### 4.2.2 Auswertung der Vertikalverformung in der Konfiguration 1

In **Abb. 114.a** ist zunächst eine Profilmessung der Konfiguration 1 dargestellt, bei der die Messrichtung quer zur Brückenachse im Bogenseitel verläuft, vergleiche **Abb. 113**. Der Standpunkt des Profilschanners lag zwischen der historischen und der neuen Trogbücke auf Höhe des Bogenseitels.



**Abb. 114.a.:** Messprofil der Konfiguration 1 mit markierten Orientierungspunkten.

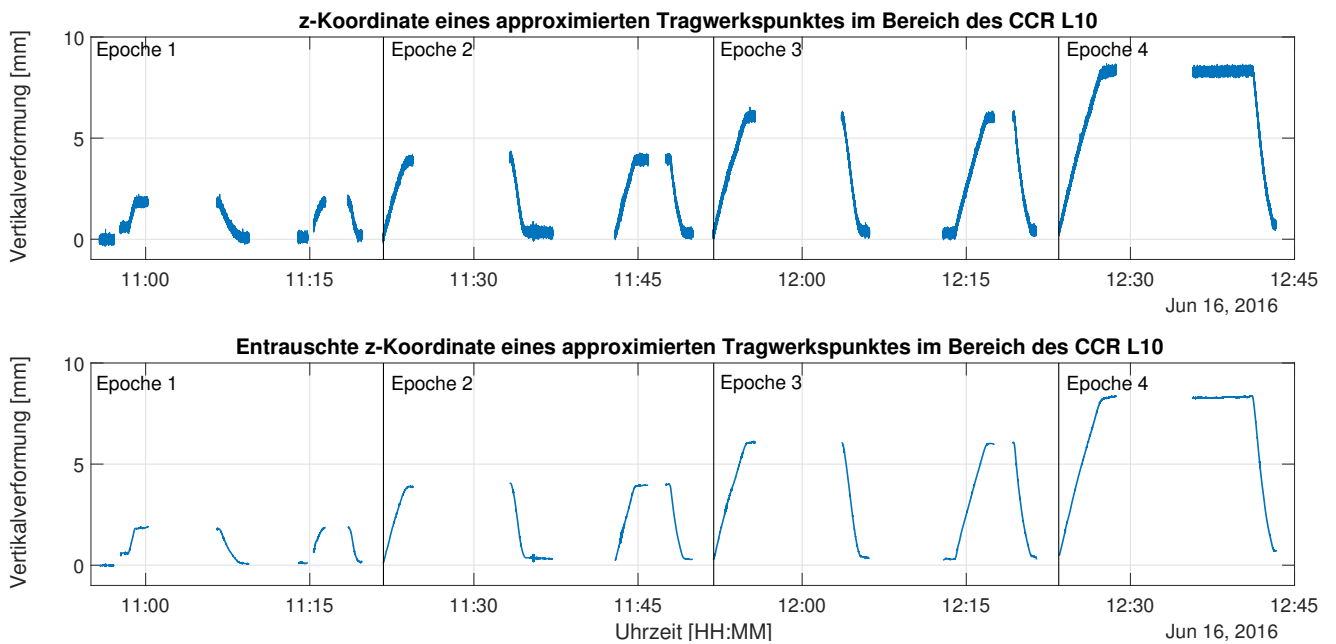
Der Ausschnitt der historischen Brücke ist in **Abb. 114.b** im Detail dargestellt. Die Positionen der Corner Cube Reflektoren (CCR) des Lasertrackers (CCR L09 - L13) sind als Vergleichsmessstellen farbig hervorgehoben, vergleiche **Abb. 114.a**. Das Messprofil des Profilschanners verläuft im Scheitel des Brückenbogens, also in unmittelbarer Nähe der eingezeichneten CCR.



**Abb. 114.b.:** Ausschnitt des Messprofils für den Bereich der historischen Brücke inklusive markierter Positionen der CCR.

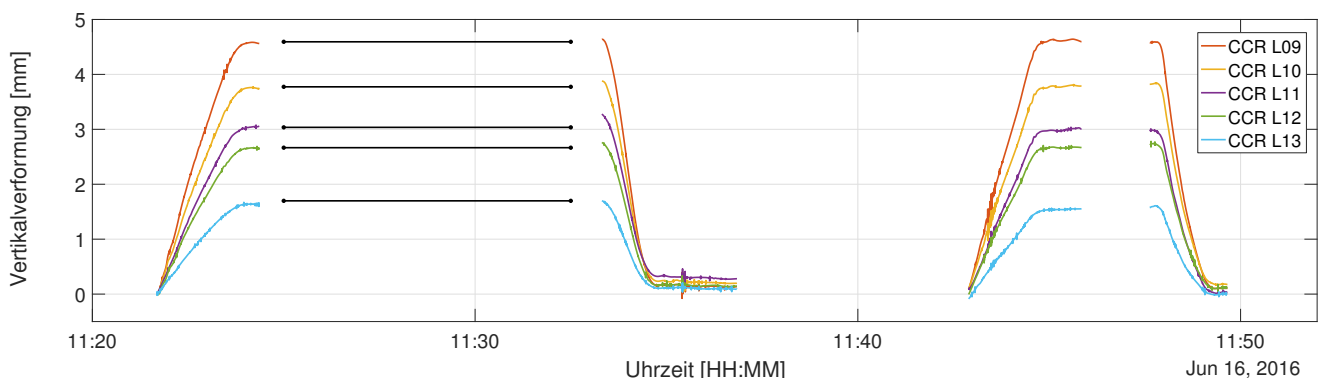
Im oberen Diagramm in **Abb. 115.a** ist zunächst die Zeitreihe der z-Koordinate eines approximierten Tragwerkspunktes im Bereich des CCR L10 für die Epochen 1 bis 4 gezeigt. Die Standardabweichung des approximierten Tragwerkspunktes liegt zwischen 0,10 und 0,12 mm. Im unteren Diagramm in **Abb. 115.a** ist die mittels Wavelet-Denoising entrauschte Zeitreihe der z-Koordinate dargestellt. Der Vergleich mit dem Belastungsregime in **Abb. 112** zeigt überschlägig, dass die Vertikalverformung nahezu linear mit der Belastung um ca. 2 mm pro MN eingebrachter Last zunimmt.

Zur Verifikation der so bestimmten Vertikalverformung wird im Folgenden die zweite Epoche des Belastungsversuches näher betrachtet und die Profilschannermessungen mit den Lasertrackermessungen des Geodätischen Institutes der Universität Hannover verglichen, siehe **Abb. 115.b**.



**Abb. 115.a.:** Ursprüngliche und entrauschte Zeitreihen der z-Koordinate des approximierten Tragwerkspunktes im Bereich des CCR L10.

Dargestellt sind die entrauschten Zeitreihen der z-Koordinaten der approximierten Tragwerkspunkte an den Positionen der CCR entsprechend den farbigen Markierungen in **Abb. 114.b**. Die Messergebnisse des Lasertrackers während der Lasthaltephase der zweiten Epoche sind als schwarze Linien eingezeichnet. Jede Lasertrackermessung wird dabei aus drei Einzelmessungen innerhalb der zehnminütigen Lasthaltephase gemittelt, sodass die Zuordnung lediglich zu der Epoche und nicht zu einem exakten Zeitpunkt stattfindet.



**Abb. 115.b.:** Zeitreihen der z-Koordinaten der approximierten Tragwerkspunkte.

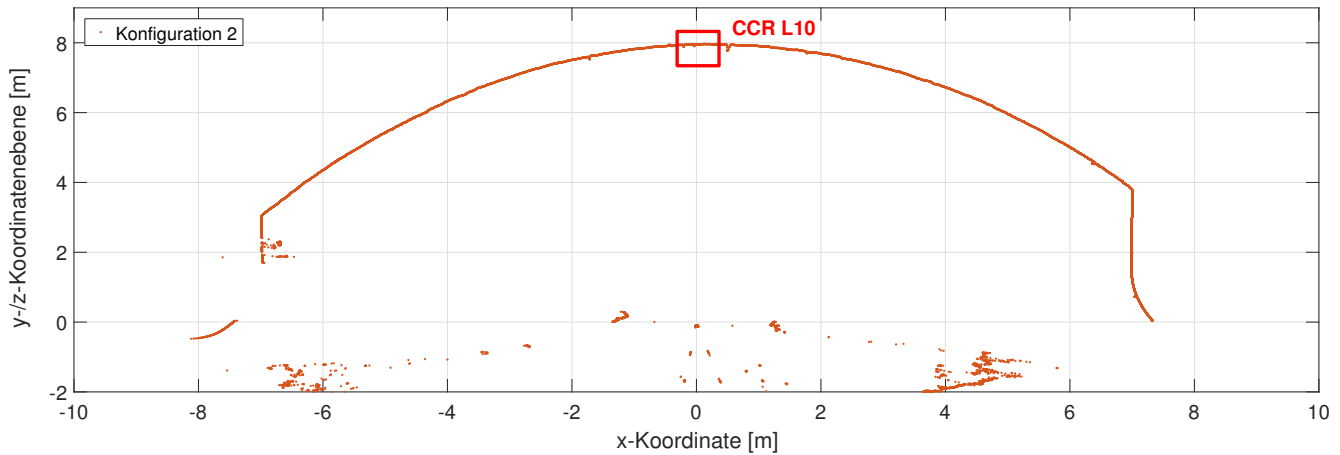
Die Maximalwerte der einzelnen Profils Scannerzeitreihen und die jeweiligen Lasertrackermessungen weichen lediglich um 0,1 bis 0,2 mm voneinander ab.

Da die Lasertrackermessungen aufgrund ihrer Genauigkeit als Referenz angesehen werden können, bestätigt dies die Ergebnisse des Vergleichs mit einem induktiven Wegaufnehmer aus Abschnitt 4.1.3. Insgesamt gesehen zeigt sich somit, dass die bestimmten Vertikalverformungen und Unsicherheitsmaße realistische Ergebnisse liefern, da die Abweichungen zwischen den Messsystemen in der gleichen Größenordnung liegen wie die bestimmten Unsicherheiten der approximierten Tragwerkspunkte.

Im Gegensatz zu den Lasertrackermessungen kann durch die hochfrequente Erfassung der Lasteintrags- und Entlastungsphasen jedoch direkt das Übertragungsverhalten des Tragwerks während der Vertikalverformung an räumlich verteilten Punkten erfasst werden.

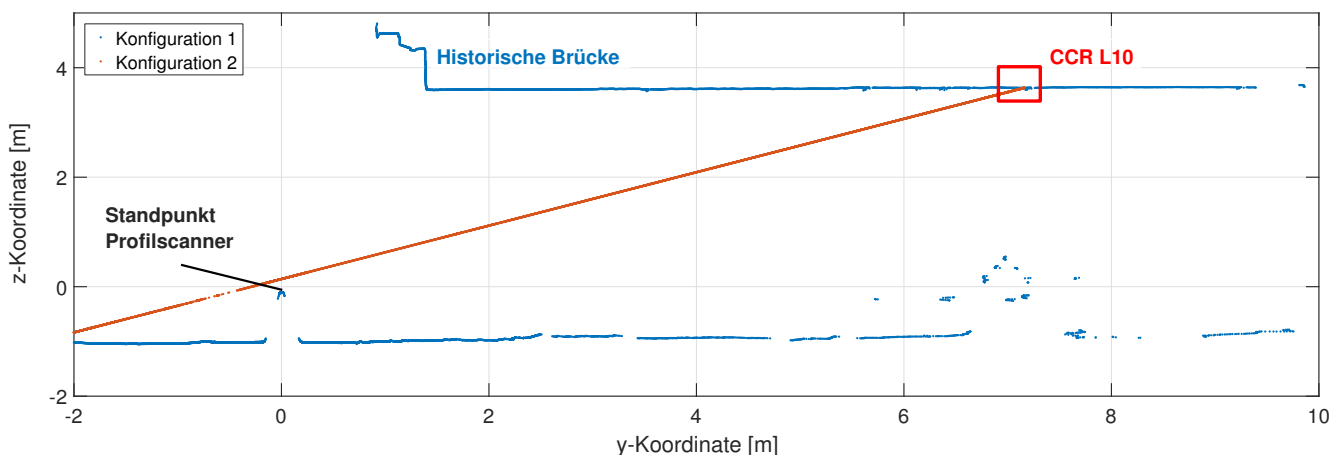
### 4.2.3 Auswertung der Vertikalverformung in der Konfiguration 2

Während der Entlastungsphase der vierten Epoche wurde der Profilschanner in die Konfiguration 2 umgebaut. Eine entsprechende Profilmessung, die in einer um 26 Grad zum Horizont verkippten Ebene liegt, ist in **Abb. 116.a** zusammen mit der Position des CCR L10 dargestellt.



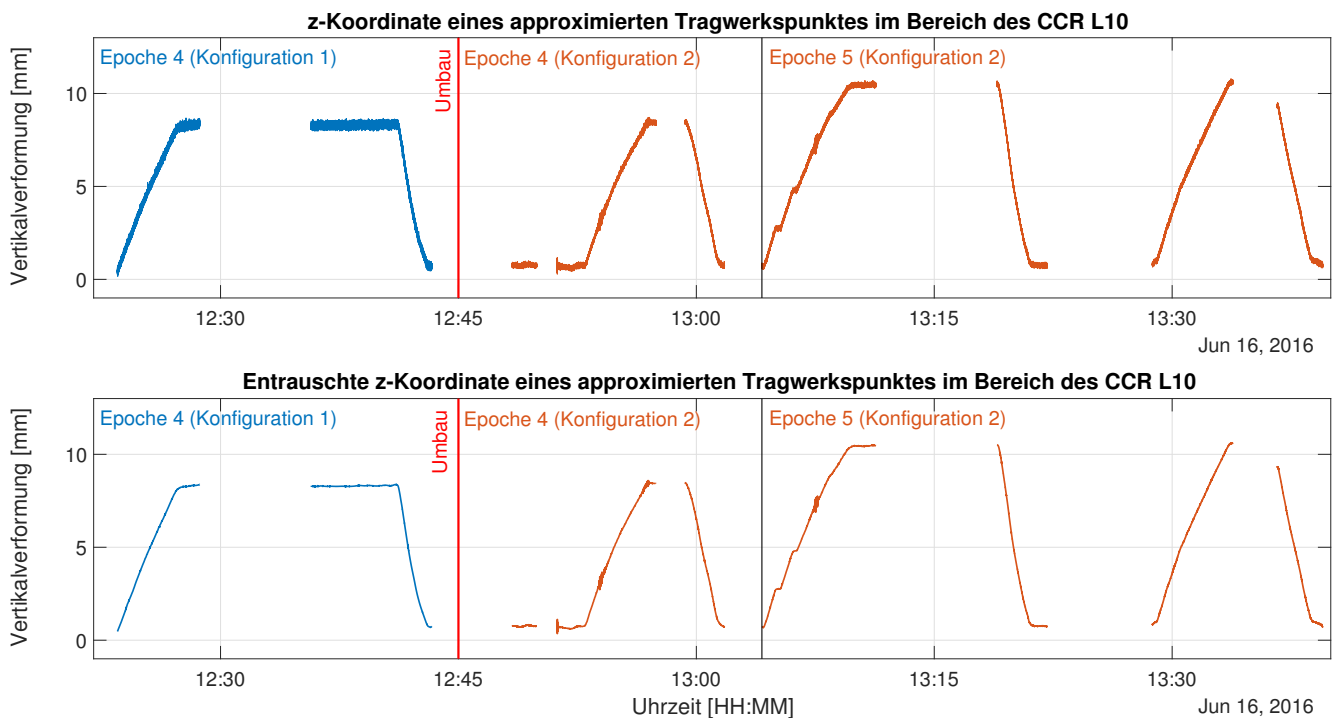
**Abb. 116.a.:** Messprofil der Konfiguration 2 in einer um 26 Grad verkippten Ebene.

In **Abb. 116.b** ist zur Einordnung der Messsituation diese Ebene im Bezug zu einem Ausschnitt der Profilmessung der Messkonfiguration 1 gezeigt. Die so entstehende Schnittebene durch die Tragwerksstruktur überschneidet sich lediglich im Bereich des CCR L10 mit den Messungen der Messkonfiguration 1. Somit wird im Folgenden zur Erhaltung der Vergleichbarkeit der beiden Konfiguration weiterhin dieser Bereich betrachtet.



**Abb. 116.b.:** Kombinierte Darstellung von Messprofilen der Konfiguration 1 und 2.

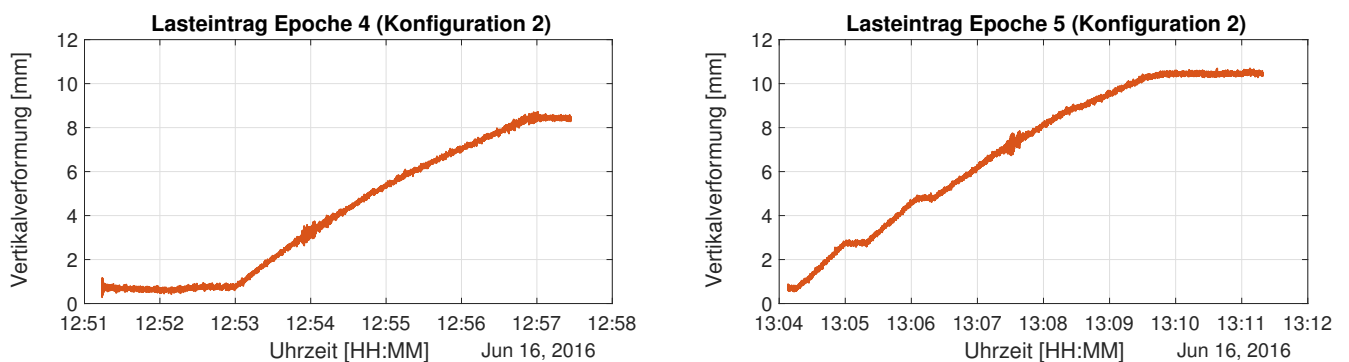
Im oberen Diagramm in **Abb. 117.a** ist ergänzend zu **Abb. 115.a** die Zeitreihe der z-Koordinate des approximierten Tragwerkspunktes im Bereich des CCR L10 für die Epochen 4 und 5 gezeigt, wobei die Projektion in die Vertikale bereits berücksichtigt ist. Die Standardabweichung der Messungen beträgt 0,14 mm. Darauf aufbauend ist im unteren Diagramm die mittels Wavelet-Denoising entrauschte Zeitreihe der z-Koordinate dargestellt.



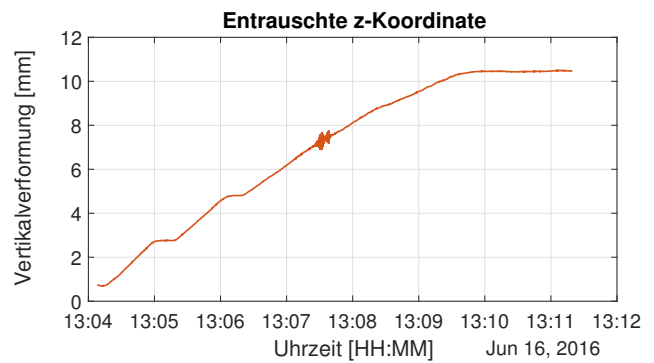
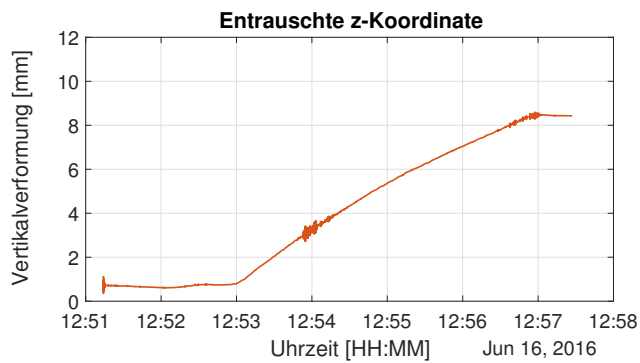
**Abb. 117.a.:** Ursprüngliche und entauschte Zeitreihen der z-Koordinate des approximierten Tragwerkspunktes im Bereich des CCR L10 für die Konfiguration 1 und 2.

Da der Umbau zwischen den beiden Belastungsphasen der vierten Epoche stattfand, kann die Annahme, dass die beiden angrenzenden Lasthaltphasen annähernd dieselbe Vertikalverformung aufweisen dahin gehend genutzt werden, die korrekte Auswertung der zweiten Messkonfiguration zu verifizieren. Der Vergleich in **Abb. 117.a** zeigt, dass auch mit den Messungen der Konfiguration 2 die Vertikalverformung korrekt bestimmt wird, da diese lediglich um ca. 0,1 mm von der Vertikalverformung der vorangegangenen Lasthaltphase abweicht. Mit dieser Voraussetzung kann auch in der fünften Laststufe wieder eine Zunahme der Vertikalverformung von ca. 2 mm nachgewiesen werden.

Darüber hinaus lassen sich in **Abb. 117.a** Artefakte in den Lasteintragsphasen der Epochen 4 (12:54 Uhr) und 5 (13:08 Uhr) der Konfiguration 2 erkennen. Um diese Auffälligkeiten im Folgenden näher zu betrachten, sind in **Abb. 117.b** und **Abb. 118.a** auf der linken Seite die Lasteintragsphase der Epoche 4 und auf der rechten Seite die der Epoche 5 dargestellt, jeweils als ursprüngliche (**Abb. 117.b**) und entauschte Zeitreihe (**Abb. 118.a**).

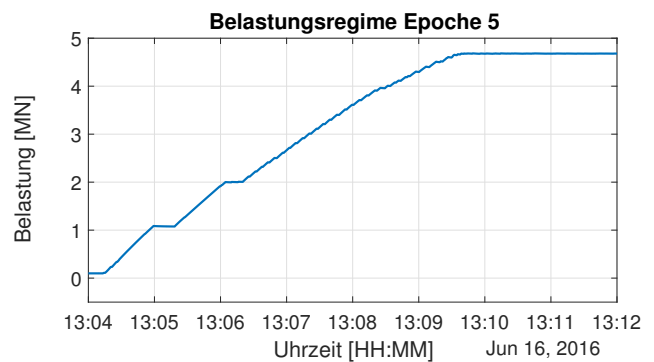
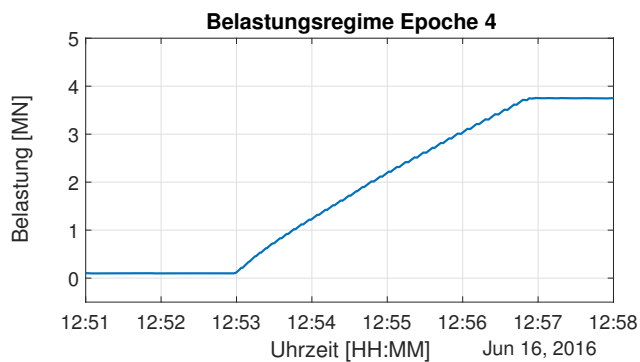


**Abb. 117.b.:** Ausschnitte der Lasteintragsphasen der Epochen 4 und 5.



**Abb. 118.a.:** Entrauschte Ausschnitte der Lasteintragsphasen der Epochen 4 und 5.

In der fünften Epoche zeigt sich im Verlauf der Vertikalverformung eine Stufenbildung, die auch im Belastungsregime zu erkennen ist, siehe **Abb. 118.b.** Die Ursache liegt in der Ansteuerung der Hydraulikpressen, bei der teilweise Zwischenstufen aus vorigen Epochen erneut mit angefahren wurden.



**Abb. 118.b.:** Ausschnitte des Belastungsregimes der Epochen 4 und 5.

Darüber hinaus treten in beiden Zeitreihenausschnitten zeitlich begrenzte, hochfrequente Schwingungen auf. Hierbei handelt es sich vermutlich um Effekte, die von den Hydraulikpressen in das Tragwerk bzw. den Untergrund übertragen werden.

Da bei der Überwachung von Tragwerken insbesondere Effekte, die vom erwarteten Tragwerksverhalten abweichen relevant sein können, muss bei der Prozessierung darauf geachtet werden, diese Effekte zu erhalten.

An diesen beiden Beispielen zeigt sich, dass dies durch den Einsatz des Wavelet-Denoising gelingen kann, da die relevanten hochfrequenten Anteile in den entrauschten Zeitreihen weiterhin erhalten bleiben. Auch die beiden Stufen in der Lasteintragsphase der Epoche 5 werden optimal approximiert. Hier zeigt sich das Potenzial der Multiskalenanalyse zur Reduzierung von Rauschanteilen, da durch die skalierte Betrachtungsweise in verschiedenen Frequenzbereichen eine effektive Trennung von Rausch- und Signalanteilen stattfinden kann. Die Verwendung eines gleitenden Mittelwertfilters würde hingegen dazu führen, dass je nach Wahl der Fenstergröße die Stufen geglättet bzw. die hochfrequenten Schwingungen entfernt würden.



---

### 4.3 ETA Fabrik: Die energieeffiziente Modellfabrik der Zukunft (TU Darmstadt)

---

Bei der ETA Fabrik, siehe **Abb. 119.a** und **Abb. 119.b**, handelt es sich um eine Modellfabrik auf dem Campus Lichtwiese der TU Darmstadt, in der interdisziplinäre Ansätze zur Reduktion des Energieverbrauchs und CO<sub>2</sub>-Ausstoßes von Fabriken untersucht werden sollen. Dazu wurde in den Jahren 2015/2016 ein Forschungs- und Demonstrationsneubau errichtet, für mehr Details siehe [ETA17].



**Abb. 119.a.:** Innenansicht der ETA-Fabrik.

Insgesamt besteht das Projekt ETA-Fabrik aus acht Teilprojekten, die sich jeweils mit einem anderen Aspekt der Energieeffizienz einer Fabrik beschäftigen. Im Rahmen des Teilprojektes 8 wurde eine energieeffiziente Gebäudehülle entwickelt. Diese ist dreischichtig aufgebaut und besteht aus einer Art Sandwichkonstruktion unterschiedlicher Betonwerkstoffe, siehe [Sch+14] und [MGS16].



**Abb. 119.b.:** Standpunkt des Profilschanners mit Industriestativ.

Die tragenden Bauteile des Hallenbereiches sind über Kapillarrohrmatten thermisch aktivierbar. Durch diese thermische Aktivierung kommt es in den Querschnitten dieser Bauteile zu einer ungleichmäßigen Temperaturverteilung und daraus resultierend zu erheblichen statischen Zusatzbelastungen, siehe [MKS16]. Der Fall der „oberflächennahen thermischen Aktivierung“ wird in der Tragwerksplanung bisher nur vereinfacht betrachtet, was zu einer deutlich zu konservativen Abschätzung der zu erwartenden Bauwerksverformung führt.

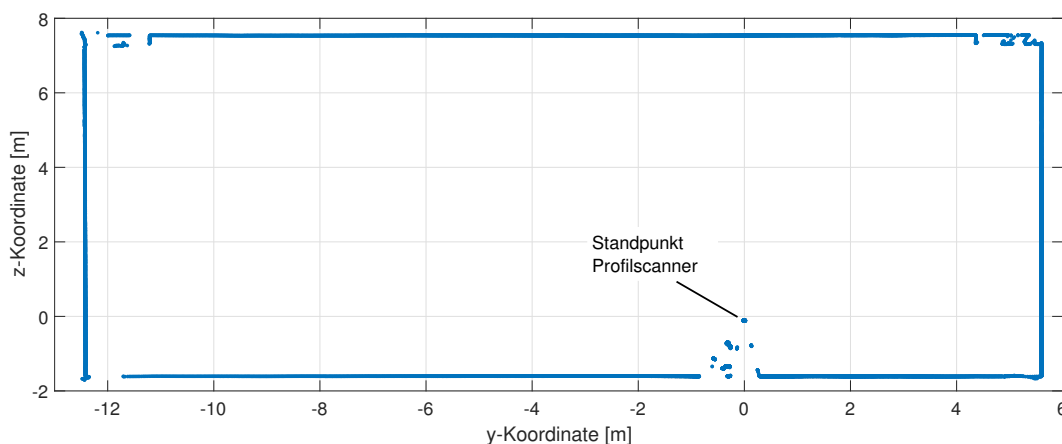
Mit den durchgeführten Überwachungsmessungen sollten die tatsächlichen Verformungen der Wand- und Deckenbereiche bestimmt werden, um durch den Vergleich mit den theoretisch berechneten Tragwerksverformungen (siehe [MKS16]) die rechnerische Abbildung des Tragverhaltens von thermisch aktivierbaren Fassadensystemen zu verbessern.

#### 4.3.1 Messdaten

Die Messungen fanden im Februar 2016 kurz vor Eröffnung der ETA-Fabrik statt. Die Messdauer betrug insgesamt drei Wochen, in der nur sehr niederfrequente Deformationen auftreten sollten. Aus diesem Grund wurde lediglich alle 15 Minuten ein 30 Sekunden andauernder Profilschan aufgezeichnet. Dazu kamen die in **Tab. 18** beschriebenen Befehle *repeat*, *lines* und *delay* zum Einsatz.

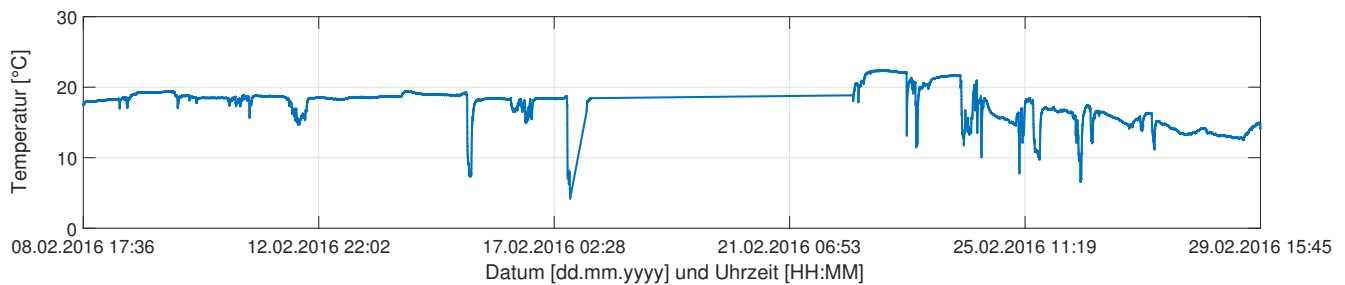
Jeder der so generierten 1800 Profilschan besteht jeweils aus über 1000 Messprofilen, die im Anschluss, ergänzend zu dem Auswerteschema aus **Abb. 92**, zu einem Messprofil zusammengefasst werden. Durch diese Zusammenfassung erfolgt der Übergang von der Auswertung von Messprofilen zur Auswertung von Profilschan.

Aufgrund der im Gebäude stattfindenden Bauarbeiten musste der Standpunkt sowohl bezüglich der Stabilität als auch der Lage entsprechend angepasst werden. Zur Stabilisierung des Profilschanners kam ein Industriestativ zum Einsatz, siehe **Abb. 119.b**. Außerdem konnte der Instrumentenstandpunkt nicht mittig im Querschnitt der Fabrik platziert werden, sondern musste asymmetrisch gewählt werden. Somit beträgt der Abstand zur Ostwand knapp 6 m und zur Westwand über 12 m, siehe **Abb. 120**.



**Abb. 120.:** Messprofil des gesamten Tragwerkprofils.

Infolge der dreiwöchigen Messdauer und den zu erwartenden Schwankungen der Lufttemperatur wurden Temperatur und Druck am Standpunkt erfasst, um die Messungen entsprechend korrigieren zu können. Die Temperaturschwankungen waren deutlich größer als sie normalerweise in Gebäuden auftreten, da bedingt durch die Bauarbeiten die großen Hallentore oft längere Zeit geöffnet waren. Die Temperatur variierte innerhalb der Messzeit um bis zu 20 Grad, wobei die Temperaturminima aufgrund der Öffnung der Tore nur zeitlich begrenzt auftraten, siehe **Abb. 121.a**.

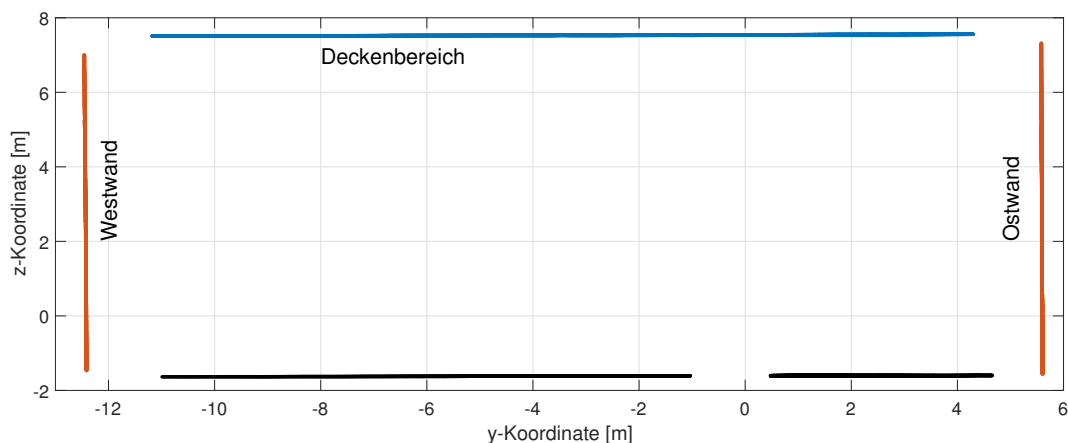


**Abb. 121.a.:** Temperaturverlauf während der gesamten Messkampagne.

Die eigentlich geplante, kontrollierte Aufheizung der Kapillarmatten in den Wand- und Deckenelementen auf 38 Grad konnte aufgrund der Baumaßnahmen nicht in vollem Umfang durchgeführt werden, da die eigentliche Heizung noch nicht voll funktionsfähig war und mit einer externen Heizeinheit gekoppelt werden musste. Eine exakte Steuerung der Heizphasen war nicht möglich, sodass keine Daten über den tatsächlichen Temperaturverlauf vorliegen. Auch die in den Heizelementen verbauten Temperatursensoren waren noch nicht betriebsbereit.

Insgesamt gesehen steht somit weder ein Soll-Temperaturprofil der Heizung noch ein Ist-Temperaturprofil der Wand bzw. Deckenelemente zur Verfügung. Die Ergebnisse der Messkampagne beschränken sich daher auf die Verformung der Tragwerksstruktur, die mit dem Profils Scanner beobachtet wurde.

Die in **Abb. 120** dargestellte Tragwerksstruktur wird für die Auswertung gemäß **Abb. 121.b** in drei Teilbereiche aufgeteilt: Westwand, Ostwand und Deckenbereich. Aufgrund von Kabelkanälen können die Übergänge zwischen den einzelnen Bereichen nicht ausgewertet werden. Es entsteht somit für jede Wand ein Auswertebereich von ungefähr 8,5 m vertikal und für die Decke von ungefähr 15 m horizontal.



**Abb. 121.b.:** Ausgewertete Bereiche des Messprofils an der Decke und den Wänden.

Da die einzelnen Auswertebereiche nahezu keine Struktur aufweisen, können prinzipiell alle drei räumlichen Prozessierungsmethoden aus Abschnitt 3.2 eingesetzt werden. Aufgrund der enormen Datenmenge (1800 Profils Scans) und der damit verbundenen Rechenzeit wird für die folgende Auswertung jedoch lediglich die räumliche Klassenbildung verwendet.

Bedingt durch den außermittigen Instrumentenstandpunkt variiert die Anzahl der ursprünglichen Messpunkte für die drei Teilbereiche der Tragwerksoberfläche. Die Klassengrößen werden jedoch so gewählt, dass in allen räumlichen Klassen ungefähr gleich viele Punkte enthalten sind. Um dies zu erreichen,

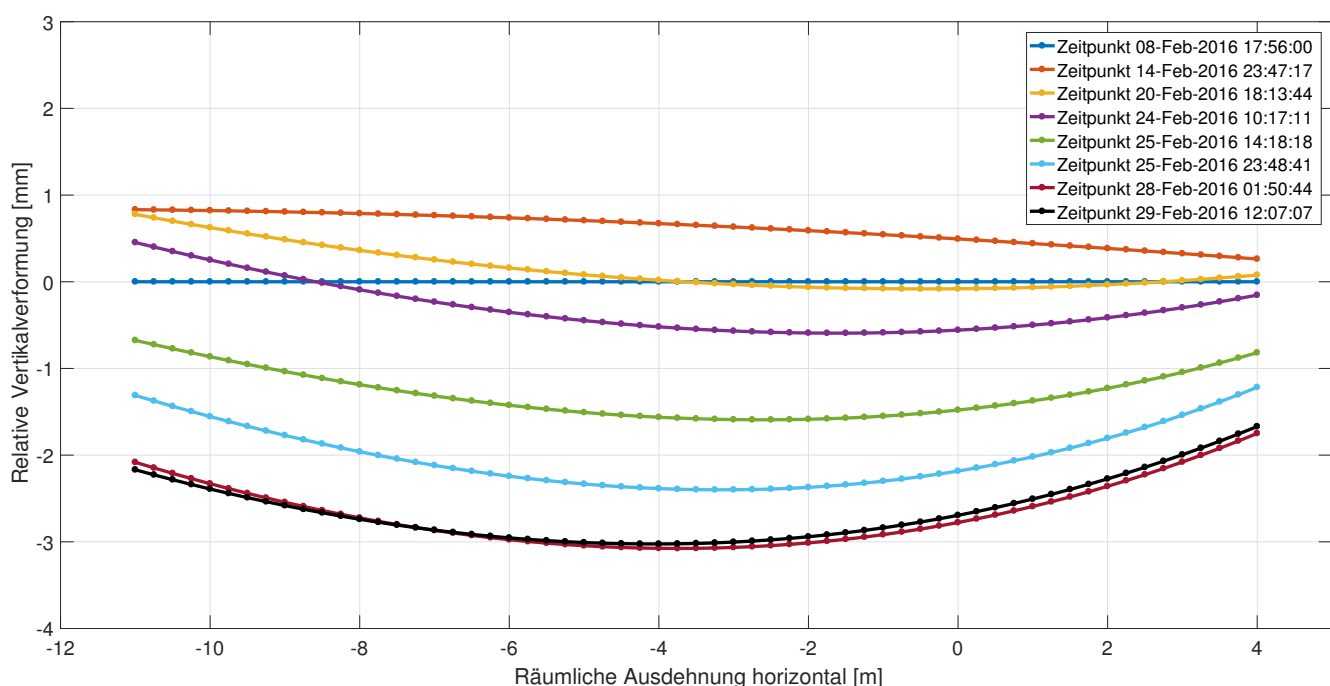
werden die in **Abb. 121.b** gezeigten Teilbereiche entsprechend der folgenden Auflistung in Klassen eingeteilt:

- Deckenbereich: 150 Klassen,
- Ostwand: 100 Klassen,
- Westwand: 50 Klassen.

Die Punktzahl pro Klasse liegt somit zwischen 30.000 und 40.000 Punkten, welche anschließend räumlich und zeitlich gemittelt werden. In die approximierten Tragwerkspunkte wird ein Polynom dritten Grades geschätzt und dabei eine Interpolation auf ein festes 0,25 m Raster (vertikal bzw. horizontal) durchgeführt. Dadurch kann eine Approximation der Decke an 61 Positionen und der Wände an 35 Positionen realisiert werden. Eine höhere Punktdichte wird für die Analyse der Tragwerksstruktur als nicht sinnvoll erachtet, könnte jedoch realisiert werden.

### 4.3.2 Auswertung der Vertikal- und Horizontalverformung

In **Abb. 122** ist die Auswertung des Deckenbereiches dargestellt. Insgesamt werden acht Epochen der raumzeitlichen Prozessierung gezeigt, beginnend mit der Referenzepoche in blau. Basierend auf dieser Referenzepoche sind die relativen Vertikalverformungen des Deckenbereiches der übrigen Epochen aufgetragen. Die Vertikalverformung des Deckenbereiches bleibt in den ersten beiden Wochen unter einem



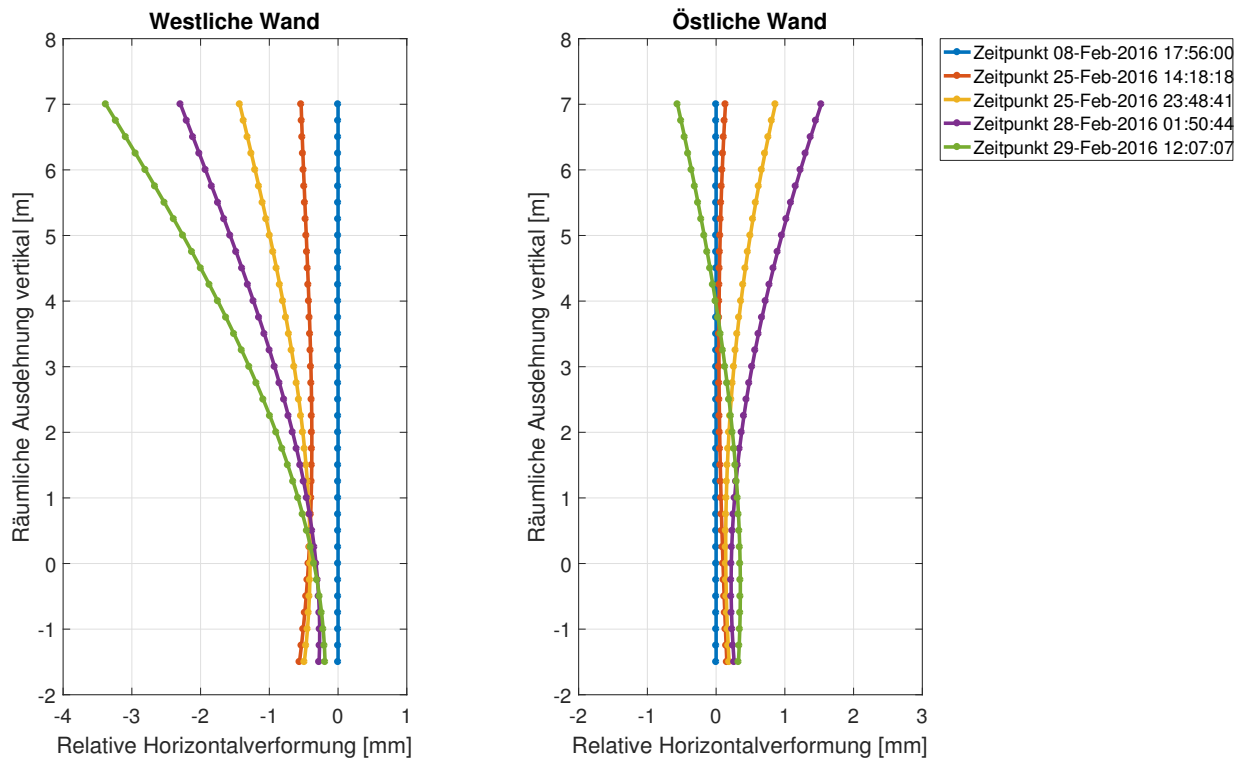
**Abb. 122.:** Epochendarstellung der raumzeitlichen Auswertung des Deckenbereiches.

Millimeter. Erst in der dritten Woche treten Verformungen von über 3 mm auf, wodurch in der Summe die maximale Vertikalverformung in der Mitte der Decke ungefähr 4 mm beträgt. Dementsprechend sind die in **Abb. 122** dargestellten Epochen nicht äquidistant bezüglich der Zeit.

Insgesamt gesehen lässt sich ein eindeutiges Deformationsverhalten des Deckenbereiches erkennen: Zunächst hebt sich die Decke insbesondere auf der westlichen Seite leicht an (rote Linie in **Abb. 122**). Im Folgenden ist dann eine nahezu 21 Tage andauernde Absenkung zu beobachten, die im späteren Verlauf an Geschwindigkeit zunimmt. Dies zeigt sich insbesondere bei der Betrachtung der grünen und

der hellblauen Epoche, für die innerhalb von knapp 10 Stunden Vertikalverformungen von ca. 1 mm zu beobachten sind. Gegen Ende der Messkampagne stagniert diese Absenkung wieder, sodass zwischen den beiden letzten dargestellten Epochen kaum noch Unterschiede auftreten.

Für die Wandbereiche treten in den ersten beiden Wochen nahezu keine Verformungen auf, weswegen auf eine Darstellung dieses Zeitraumes verzichtet wird. In **Abb. 123** sind die horizontalen Verformungen der beiden Wandbereiche für die dritte Woche der Messungen dargestellt. Im linken Diagramm wird die westliche Wand und im rechten Diagramm die östliche Wand gezeigt. Die dargestellten Zeitpunkte der dritten Woche sowie der Referenzzeitpunkt entsprechen den Epochen des ausgewerteten Deckenbereichs in **Abb. 122**.



**Abb. 123.:** Epochendarstellung der raumzeitlichen Auswertung der Wandbereiche.

Bei der westlichen Wand zeigt sich ein eindeutiges Deformationsverhalten: Die Wand neigt sich kontinuierlich in eine Richtung, und zwar um über 3 mm nach außen. Die Ostwand zeigt zunächst dasselbe Deformationsverhalten in gegenläufiger Richtung, jedoch mit einer deutlich geringeren Amplitude von lediglich 1,5 mm. In den letzten 12 Stunden der Messkampagne ändert sich aber die Deformationsrichtung und die Wand neigt sich über ihre Ausgangslage hinweg in die entgegengesetzte Richtung (schwarze Linie in **Abb. 123** auf der rechten Seite). Eine Fortführung der Untersuchung war zu diesem Zeitpunkt nicht möglich, da die Messkampagne aufgrund der Eröffnung der ETA-Fabrik beendet werden musste.

Insgesamt gesehen zeigt sich, dass der Profils Scanner auch bei lang andauernden, niederfrequenten Verformungsprozessen sinnvoll eingesetzt werden kann. Dabei lassen sich auch Verformungen im Submillimeterbereich über längere Zeiträume erfassen.

Die hier gewonnenen Ergebnisse bieten einen ersten Einblick in ein mögliches Einsatzgebiet bei der Langzeitüberwachung von thermisch aktivierbaren Tragwerken. Durch die Kombination mit der fest verbauten Sensorik in der ETA-Fabrik und einem definierten Temperaturprofil sollen in künftigen Untersuchungen Rückschlüsse auf das tatsächliche Tragwerksverhalten gezogen werden. Dabei können durch die Erfassung der Verformung der primären Tragwerksstruktur Erfahrungswerte gesammelt werden, um die rechnerische Abbildung des Tragverhaltens der Fassadensysteme zu optimieren und zu verifizieren, siehe [MKS16].



---

## 4.4 Trogbrücke über die Aller

---

Bei dem Messobjekt handelt es sich um eine neu gebaute Eisenbahnbrücke über die Aller bei Verden, welche die historische Gewölbebrücke aus Abschnitt 4.2 ersetzt. Sie liegt ebenfalls auf der Strecke von Wunstorf nach Bremerhaven (Strecke 1740, Kilometer 84,9). Die Brücke ist insgesamt 380 Meter lang, besteht aus sieben Brückenfeldern und wurde als fugenlose Stahlbrücke ausgeführt. Die maximale Streckengeschwindigkeit beträgt 160 km/h.



**Abb. 124.:** Neue Trogbrücke über die Aller.

Alle Messungen fanden am östlichen Hauptträger der Brücke in Längsrichtung statt. Das gemessene Feld hat eine Spannweite von ca. 50 m, siehe **Abb. 124**. Die Oberfläche des Hauptträgers weist aufgrund der Bauweise keine Strukturierung auf, sodass bei der automatischen Analyse des Messprofils lediglich ein Segment entsteht.

Aus diesem Grund eignen sich prinzipiell alle in Abschnitt 3.2 vorgestellten räumlichen Prozessierungsmethoden zur Weiterverarbeitung. Im Folgenden wird daher zunächst ein Vergleich der Prozessierungsmethoden durchgeführt.

---

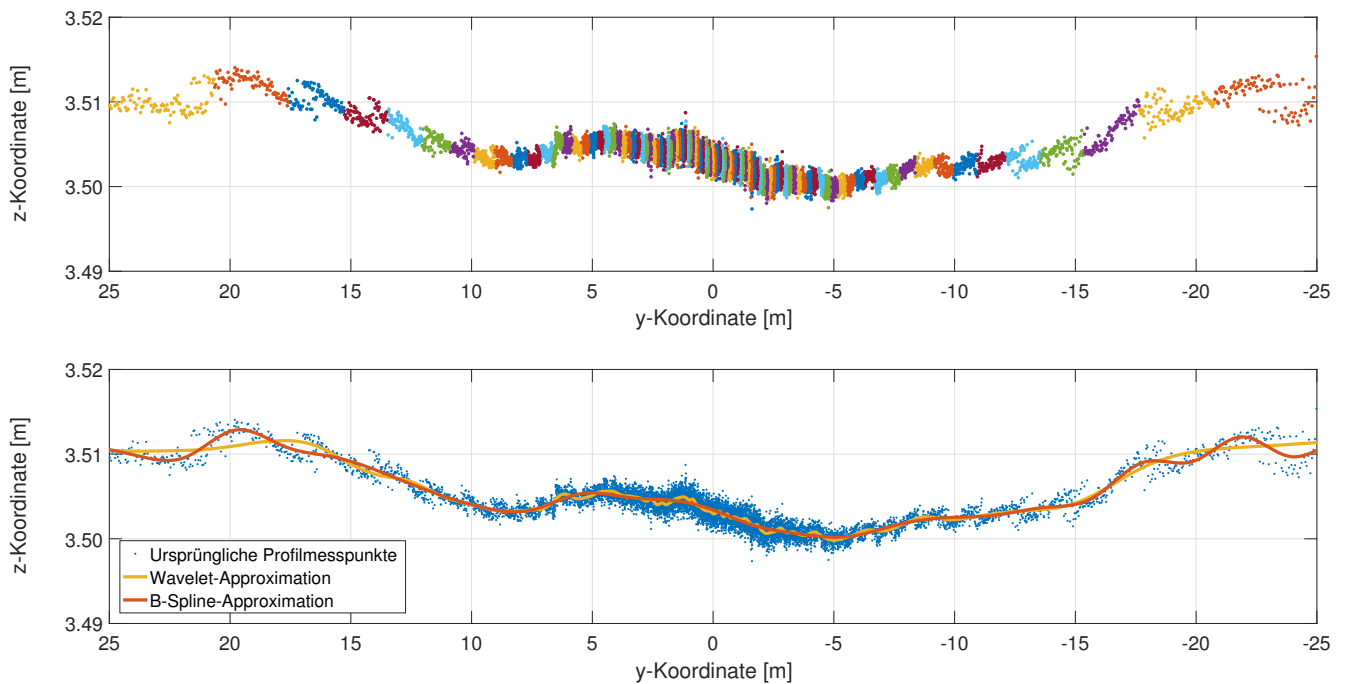
### 4.4.1 Vergleich der Prozessierungsmethoden

---

In **Abb. 125.a** ist das Messprofil am östlichen Hauptträger zwischen zwei Auflagern gezeigt, wobei im oberen Diagramm die Messpunkte in 100 räumliche Klassen aufgeteilt und entsprechend eingefärbt sind. Die Ausdehnung der räumlichen Klassen wird so gewählt, dass alle Klassen ungefähr gleich viele Profilmesspunkte beinhalten (jeweils ca. 90 Punkte), wodurch die Klassenausdehnung zwischen 0,1 m und 4 m variiert.

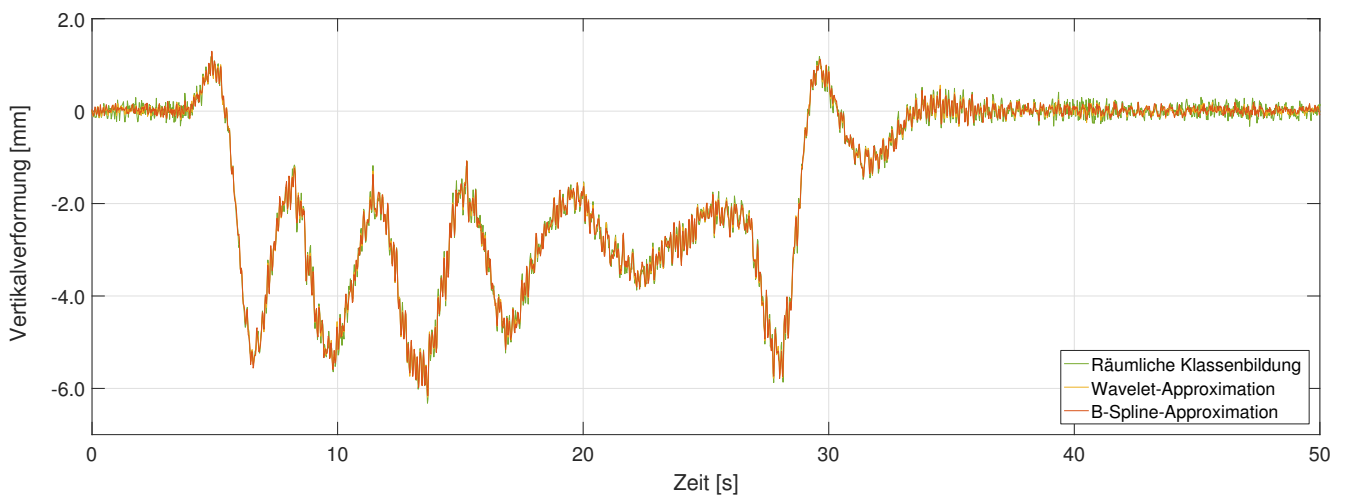
Im unteren Diagramm sind die räumlichen Prozessierungen mittels B-Spline- und Wavelet-Approximation dargestellt. Für die Approximation mit B-Splines wird die Basis-Methode verwendet und für die Wavelet-Approximation kommt ein Daubechies Wavelet der Ordnung 9 mit einer Zerlegungstiefe von 7 und Soft-Thresholding zum Einsatz.





**Abb. 125.a.:** Räumliche Klassenbildung, B-Spline- und Wavelet-Approximation.

Um die drei räumlichen Prozessierungsmethoden miteinander vergleichen zu können, müssen mit allen Methoden dieselben Positionen am Tragwerk ausgewertet werden. Diese Positionen sind in diesem Fall durch die Repräsentanten der 100 Klassen vorgegeben und werden auch mit den beiden anderen Prozessierungsmethoden ausgewertet. Insgesamt stehen damit 100 über das gesamte Tragwerk verteilte Zeitreihen der drei Prozessierungsmethoden zur Verfügung. In **Abb. 125.b** sind die Zeitreihen der z-Koordinate beispielhaft für eine Position am Tragwerk (y-Koordinate -10,39 m) dargestellt. Es handelt sich um einen 50-sekündigen Ausschnitt der Überfahrt eines Güterzuges.



**Abb. 125.b.:** Zeitreihen der z-Koordinaten der drei Prozessierungsmethoden an der y-Koordinate -10,39 m.

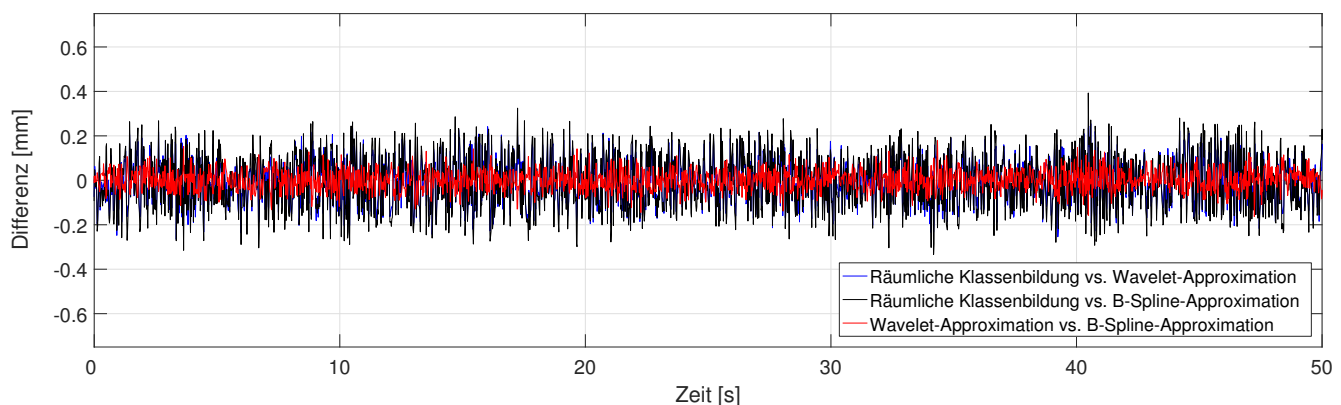
Für die dargestellten Zeitreihen ergibt sich die jeweilige Standardabweichung aus Bereichen der Zeitreihe vor und nach der Überfahrt, in denen sich das Tragwerk hinreichend in Ruhe befindet zu:

- 0,12 mm für die räumliche Klassenbildung,
- 0,06 mm für die Wavelet-Approximation,
- 0,06 mm für die B-Spline-Approximation.

In **Abb. 126** sind die Differenzen zwischen allen drei Prozessierungsmethoden dargestellt. Diese Differenzen weisen keine systematischen Effekte auf.

Die größere Standardabweichung der räumlichen Klassenbildung wirkt sich dahin gehend aus, dass die Differenzen der anderen beiden Methoden zur räumlichen Klassenbildung deutlich größer sind als die Differenzen zwischen der Wavelet-Approximation und der B-Spline-Approximation.

Aufgrund der niedrigeren Standardabweichung bzw. höheren Approximationsgüte eignen sich insbesondere die Wavelet- und die B-Spline-Approximation für die weitere Verwendung im Rahmen dieses Beispiels. Beide Methoden liefern nahezu identische Ergebnisse. Im Folgenden kommt zunächst die B-Spline-Approximation zum Einsatz. Die Wavelet-Approximation wird in Abschnitt 4.5 am Turm einer Windenergieanlage eingesetzt.



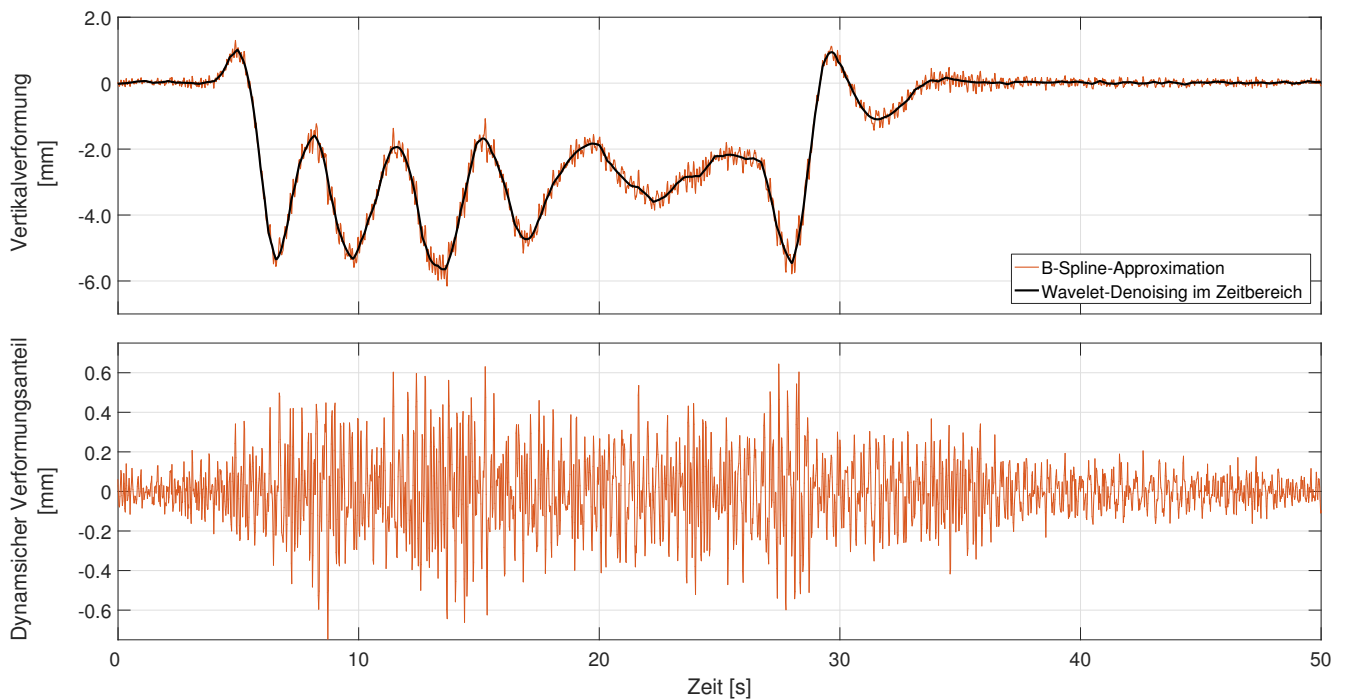
**Abb. 126.:** Differenzen zwischen den Ergebnissen der drei Prozessierungsmethoden.

#### 4.4.2 Analyse von dynamischen Verformungsanteilen

Die Zeitreihen aus **Abb. 125.b** setzen sich aus einem niederfrequenten Signalanteil aufgrund der Last des Zuges und einem überlagerten hochfrequenten Signalanteil aufgrund der dynamischen Anregung der Drehgestelle des Zuges zusammen. Im Folgenden werden diese beiden Anteile als quasistatischer und dynamischer Signalanteil bezeichnet.

Mit dem Einsatz des Wavelet-Denoising im Zeitbereich kann nicht nur Rauschen eliminiert, sondern auch die Trennung von Frequenzbereichen realisiert werden. Somit kann der Übergang von einer Betrachtung der Gesamtverformung zur Betrachtung des dynamischen Verformungsanteils realisiert werden, siehe **Abb. 127**.

Im oberen Diagramm ist die ursprüngliche Zeitreihe in rot zusammen mit dem mittels Wavelet-Denoising bestimmten quasistatischen Signalanteil in schwarz dargestellt. Die Differenz dieser beiden Zeitreihen ist im unteren Diagramm gezeigt und repräsentiert den dynamischen Verformungsanteil.



**Abb. 127.:** Trennung des quasistatischen vom dynamischen Verformungsanteil mittels Wavelet-Denoising.

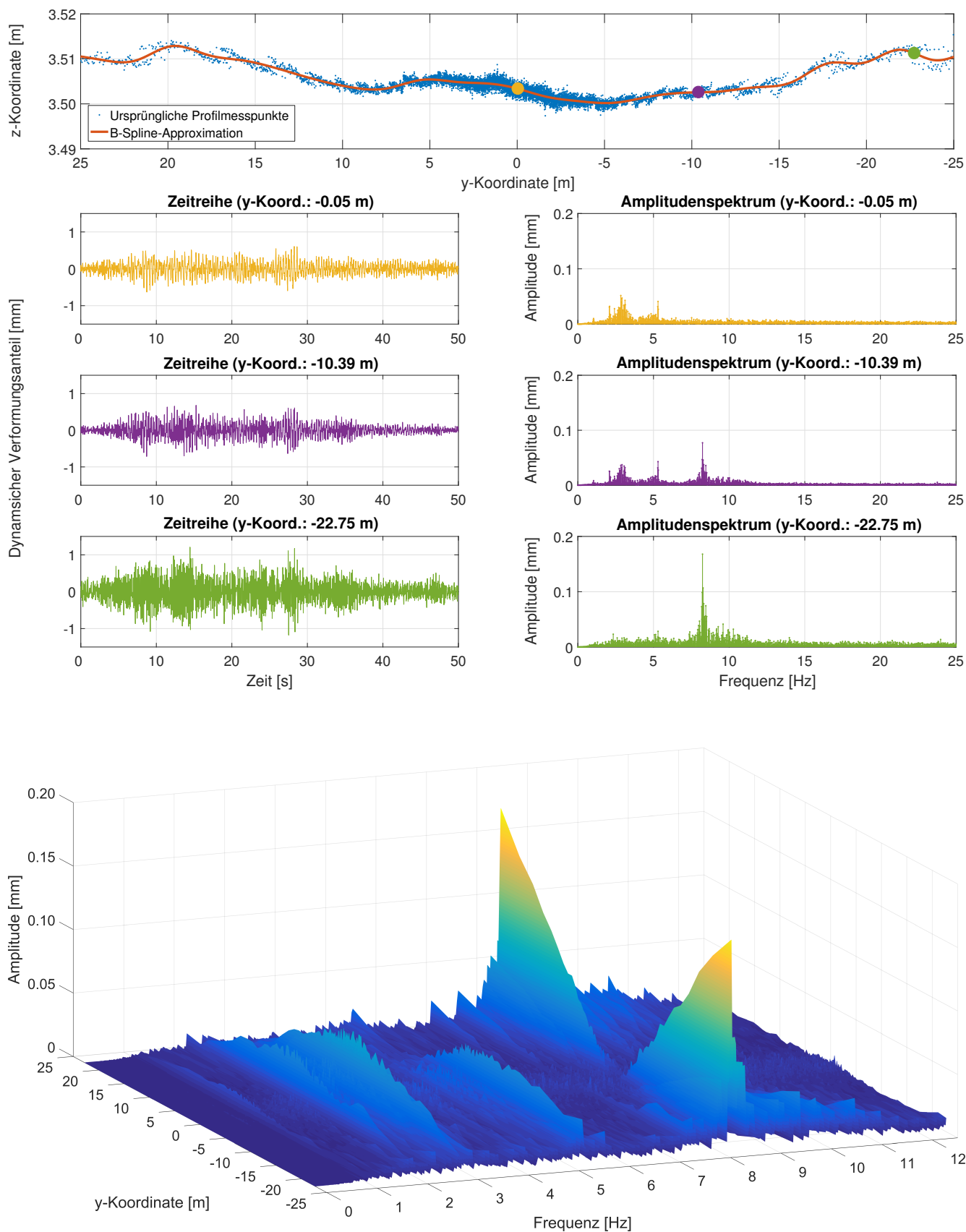
Aufbauend auf der Trennung des quasistatischen vom dynamischen Verformungsanteil werden im Folgenden zunächst drei ausgewählte Positionen am Tragwerk näher betrachtet. Dabei handelt es sich um eine Position in der Mitte des Feldes (y-Koordinate: -0,05 m), ungefähr den Viertelpunkt (y-Koordinate: -10,39 m) sowie eine Position kurz vor dem Auflager (y-Koordinate: -22,75 m). Diese drei Positionen sind im obersten Diagramm in **Abb. 128** mit farbigen Punkten hervorgehoben. Die Wahl dieser Positionen ist in den theoretischen Eigenformen einer Brücke begründet. Während in der Mitte der Brücke die erste Eigenform ihr Maximum hat, weist die zweite Eigenform dort einen Nulldurchgang auf. Im Viertelpunkt besitzt dagegen die zweite Eigenform ihr Maximum, während die Amplitude der ersten Eigenform abnimmt.

In den sechs darunter dargestellten Diagrammen in **Abb. 128** sind auf der linken Seite jeweils die dynamischen Verformungsanteile der einzelnen Positionen gezeigt und auf der rechten Seite die entsprechenden Amplitudenspektren. Für die drei Positionen am Tragwerk können in den Amplitudenspektren drei Bereiche identifiziert werden, in denen Frequenzen auftreten, die über dem Rauschniveau liegen: ungefähr bei 2 - 3 Hz, bei 5 Hz und bei 8 Hz.

Diese Darstellung von diskreten Positionen des Tragwerks entspricht der Auswertung klassischer Sensoren, die zur Messung von Brückentragwerken eingesetzt werden. Durch die nahezu raumkontinuierliche Erfassung der Tragwerksoberfläche mit dem Profils Scanner kann jedoch dazu übergegangen werden, das gesamte Brückenfeld detailliert zu betrachten. Eine entsprechende Darstellung findet sich im untersten Diagramm in **Abb. 128**. In diesem ist auf der x-Achse die Position am Tragwerk (y-Koordinatenwerte), auf der y-Achse die Frequenz und auf der z-Achse die Amplitude aufgetragen. Der Frequenzbereich ist aus Übersichtlichkeitsgründen auf den relevanten Bereich bis 12 Hz beschränkt.

Die Amplituden der zuvor beschriebenen Frequenzbereiche lassen sich über das gesamte Brückenfeld verfolgen. Es zeigt sich dabei, dass beispielsweise die Amplituden bei ca. 5 Hz nicht symmetrisch um die Brückenmitte auftreten, sondern hauptsächlich im negativen x-Achsenabschnitt.

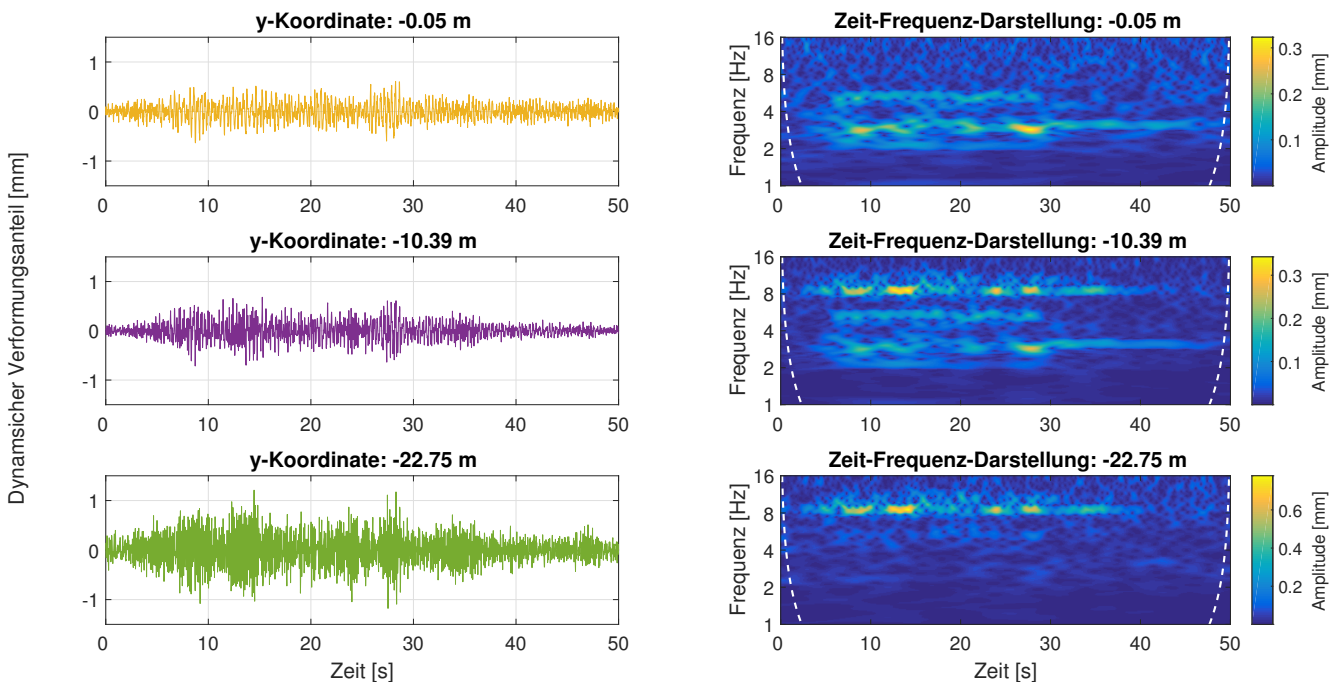
Da die den Amplitudenspektren zugrunde liegenden Zeitreihen sowohl die Zugüberfahrt beinhalten, als auch Bereiche, in denen sich das Tragwerk in Ruhe befindet und auch das freie Ausschlagen des Tragwer-



**Abb. 128.:** Dynamischer Verformungsanteil im Zeit- und Frequenzbereich.

kes, kann anhand der Amplitudenspektren keine Aussage über die Zuordnung der Frequenzbereiche zu den Eigenfrequenzen getroffen werden. Prinzipiell lässt sich lediglich feststellen, dass gewisse Frequenzen innerhalb der Zeitreihe zumindest zeitweise auftreten sind.

Um weitergehende Aussagen über die zeitliche Charakteristik der einzelnen Frequenzen treffen zu können, bietet sich die kontinuierliche Wavelet-Transformation (CWT, engl.: continuous wavelet transform) entsprechend Abschnitt 3.1.1 an. In **Abb. 129** sind dieselben Zeitreihen wie in **Abb. 128** dargestellt, es wurden lediglich die Amplitudenspektren durch entsprechende Zeit-Frequenz-Darstellungen der CWT ersetzt.



**Abb. 129.:** Dynamischer Verformungsanteil im Zeitbereich (linke Seite) und in der Zeit-Frequenz-Ebene (rechte Seite). Die Farbskalen der CWT sind unterschiedlich skaliert.

Die Zeit-Frequenz-Darstellungen bilden auf der x-Achse die Zeit und auf der y-Achse die Frequenz ab und stellen die Energie über eine Farbskala von blau zu gelb dar. Die kontinuierlichen Skalen der CWT werden dazu diskretisiert und auf den relevanten Frequenzausschnitt begrenzt.

Auch in dieser Darstellung lassen sich für alle drei Positionen am Tragwerk wieder dieselben drei Frequenzbereiche wie in **Abb. 128** erkennen, in denen relevante Amplituden auftreten (2 - 3 Hz, 5 Hz und 8 Hz). Darüber hinaus können durch den Einsatz der CWT auch Informationen über das zeitliche Auftreten und die dabei tatsächlich auftretende Energie erfasst werden.

Für die Tragwerksposition -0,05 m zeigt sich in der Zeit-Frequenz-Darstellung, dass die Energie bei 5 Hz lediglich in der Zeitspanne von 5 bis 30 Sekunden vorhanden ist. Der Vergleich mit **Abb. 125.b** macht deutlich, dass es sich dabei ungefähr um die Zeitspanne handelt, in der sich der Zug auf dem untersuchten Feld der Brücke befindet. Die Energie bei 3 Hz bleibt hingegen auch nach Sekunde 30 erhalten, jedoch mit abnehmender Amplitude.

Für die Tragwerksposition -10,39 m kann in der Zeit-Frequenz-Darstellung ein ähnliches Muster beobachtet werden. Auch hier ist die Energie bei 5 Hz nur während der Zugüberfahrt vorhanden, bei 3 Hz und 8 Hz hingegen auch noch im Anschluss. Bei der Tragwerksposition -22,75 m ist lediglich Energie bei 8 Hz zu erkennen, die sich entsprechend den vorangegangenen Ausführungen verhält.

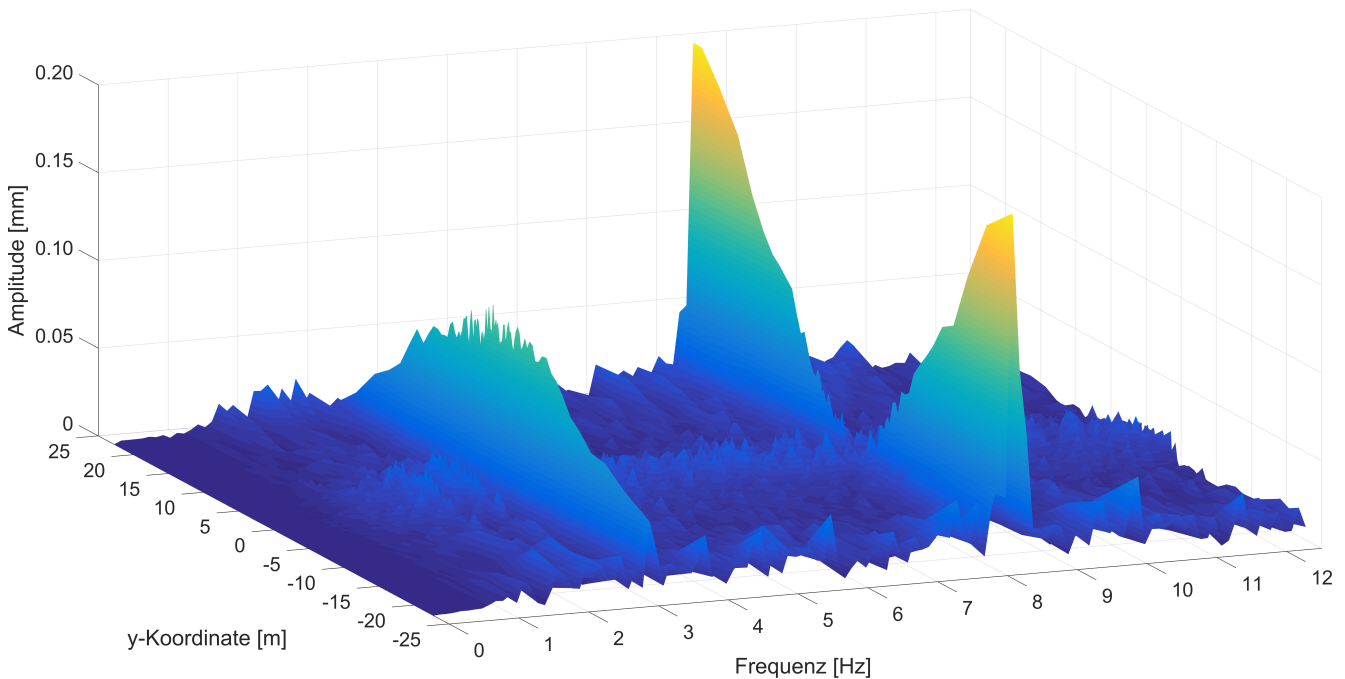
Insgesamt lässt sich daraus schließen, dass es sich bei den Frequenzen von 3,1 Hz und 8,3 Hz um die

erste und zweite Eigenfrequenz der Brücke handelt, wohingegen es sich bei der Schwingung im Bereich von 5 Hz um eine erzwungene Schwingung aufgrund der Zugüberfahrt handelt.

Darüber hinaus zeigt sich auch, dass die Zeitpunkte mit maximaler Energie im Frequenzbereich um 3 Hz und 8 Hz in allen Zeit-Frequenz-Darstellungen identisch sind, und zwar um Sekunde 10 und vor Sekunde 30. Der Vergleich mit **Abb. 125.b** deckt auf, dass es sich dabei um die Zeitpunkte handelt, bei denen die maximalen quasistatischen Verformungsänderungen auftreten, d. h. große Lastwechsel stattfinden, was zu einer Anregung der Brücke führt. Dieser Zusammenhang lässt sich bei 5 Hz nicht erkennen. Dies deutet ebenfalls daraufhin, dass die Schwingung bei 5 Hz anderweitig induziert wird, z. B. als erzwungene Schwingung durch die Drehgestelle der Waggon.

Abschließend sollen die diskutierten Zusammenhänge am freien Ausschlagen der Brücke, nachdem der Zug das untersuchte Feld verlassen hat, verdeutlicht werden. In **Abb. 130** ist dieser Ausschnitt der Zeitreihe für das gesamte Tragwerksfeld dargestellt. Hier treten entsprechend den obigen Ausführungen Amplituden bei den Frequenzen 3,1 Hz und 8,3 Hz auf. Die zuvor auftretenden Amplituden bei 5 Hz und die weiteren Nebenmaxima im Frequenzbereich um 3 Hz sind dagegen nicht mehr vorhanden, vergleiche **Abb. 128**.

Damit wird veranschaulicht, dass es sich bei 3,1 Hz um die erste und bei 8,3 Hz um die zweite Eigenfrequenz handelt. Zusätzlich wird dies durch die Phasenlage der auftretenden Frequenzen bestätigt, da diese bei 3,1 Hz (erste Eigenfrequenz) über das gesamte Tragwerk konstant ist, während die Phasenlage bei 8,3 Hz (zweite Eigenfrequenz) gegenläufig symmetrisch zur Brückenmitte ist.



**Abb. 130.:** Amplitudenspektrum des dynamischen Verformungsanteils für das freie Ausschlagen des Brückenfeldes.



---

## 4.5 Windenergieanlage Tacke TW600 (Neutscher Höhe)

---

Die untersuchte Windenergieanlage befindet sich südlich von Darmstadt auf der Neutscher Höhe. Es handelt sich um das Modell Tacke TW600, siehe **Abb. 131**. Diese spezielle Windenergieanlage wurde 1994 errichtet und weist eine Nabenhöhe von 50 m auf. Die Rotorblätter sind fixiert und das System ist stallgeregelt mit einer festen Rotationsgeschwindigkeit von 18 oder 27 Umdrehungen pro Minute. Die Leistungsregelung erfolgt dabei lediglich über die Bauweise der Rotorblätter, deren aerodynamische Profil so angelegt ist, dass bei Erreichen einer bestimmten Windgeschwindigkeit ein Strömungsabriss (Stall) an den Rotorblättern entsteht. Dadurch werden die Antriebskräfte auf den Rotor reduziert und die Anlage überdreht nicht.

Die typische Entwurfslebensdauer einer Windenergieanlage beträgt 20 Jahre. Für diese Dauer werden die Nachweise der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit erbracht. Für einen anschließenden Weiterbetrieb einer Anlage muss der aktuelle Zustand erfasst und bewertet werden, siehe u. a. [FFS05] und [Kam+15]. Durch die berührungslose, nahezu kontinuierliche Erfassung des Tragwerks (Turm) können durch den Einsatz eines Profilsensors Strukturparameter für diese Untersuchungen effizient erfasst werden.

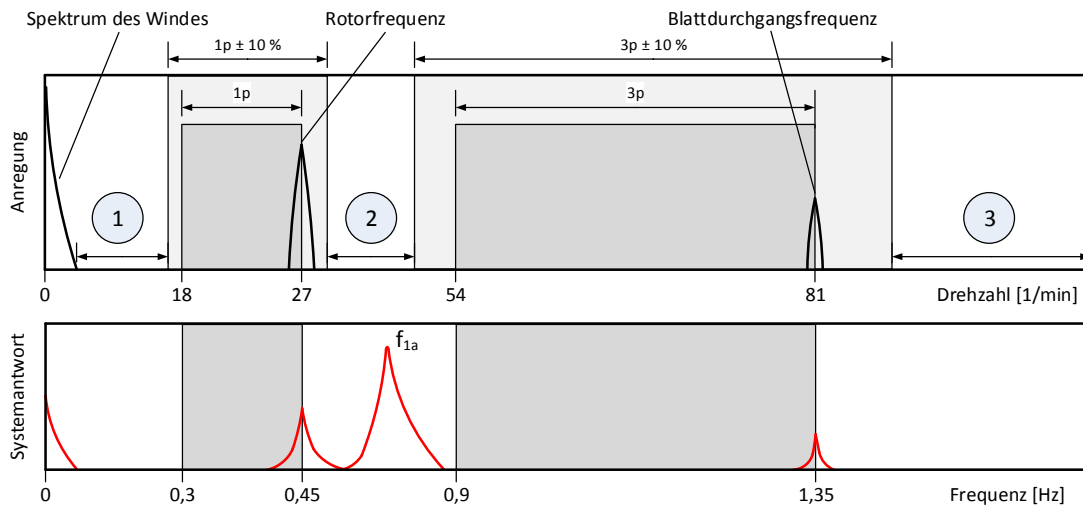


**Abb. 131.:** Windenergieanlage Tacke TW600.

Eine Windenergieanlage erfährt im laufenden Betrieb dynamische Anregungen unterschiedlicher Art. Hervorzuheben sind dabei:

- die nichtperiodische, stochastische Anregung durch den (böigen) Wind,
- periodische Anregung mit der einfachen Umdrehungsgeschwindigkeit („1p Anregung“), z. B. aufgrund einer Rotorunwucht (mechanische Unwucht) oder einer aerodynamischen Unwucht,
- periodische Anregung mit der dreifachen Umdrehungsgeschwindigkeit („3p Anregung“) aufgrund des Blattdurchgangs in Kombination mit der Windscherung, dem Turmvorstau oder partiellen Böen.

Da es sich bei einer Windenergieanlage um ein besonders schwingungsfähiges Bauwerk handelt, sind diese Effekte bei der Konstruktion und Überwachung entscheidend. Dabei ist insbesondere zu berücksichtigen, dass die erste Eigenfrequenz nicht in Bereichen liegen darf, in denen dynamische Anregungen zu erwarten sind. Am Beispiel des Modells Tacke TW600 sind in **Abb. 132** die Anregungsfrequenzen und die Systemantwort dargestellt. Die schmalen Frequenzbänder, die für die Lage der ersten Eigenfrequenz überhaupt in Frage kommen, sind entsprechend markiert (1, 2 und 3).



**Abb. 132.:** Anregungsfrequenzen der Windenergieanlage Tacke TW600 mit möglichen Positionen für die erste Eigenfrequenz.

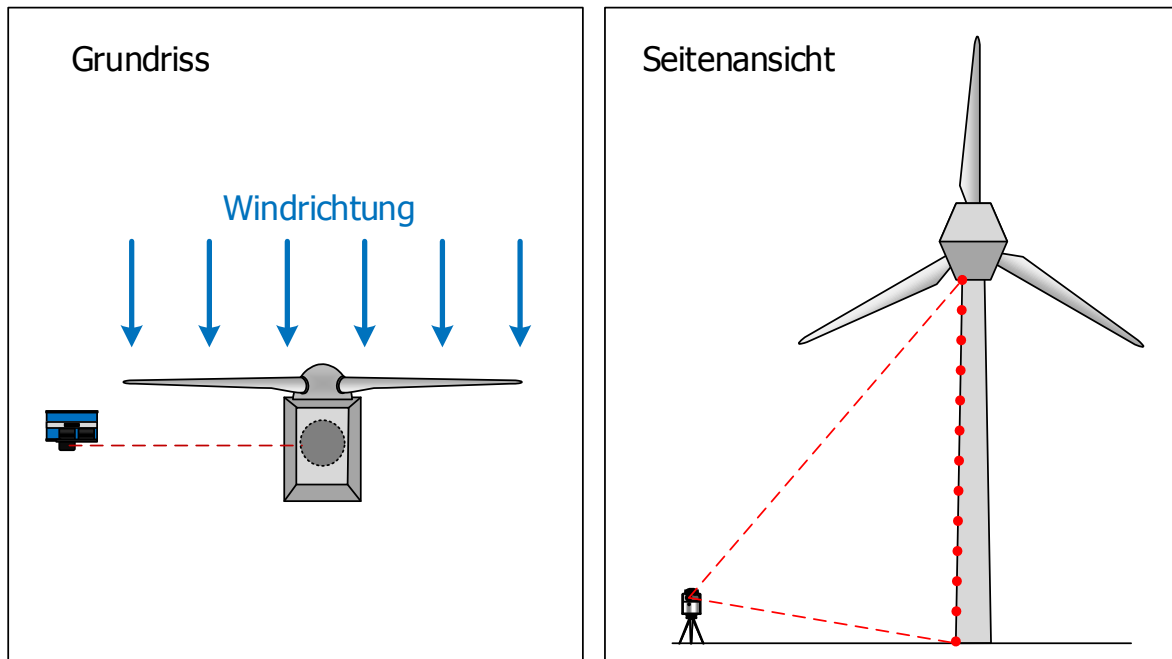
Die zu erwartende erste Eigenfrequenz  $f_{1a}$  liegt ungefähr bei 0,69 Hz und liegt damit im möglichen Frequenzband 2. Aufgrund der Stallregelung des Modells Tacke TW600 und dem damit einhergehenden Betrieb der Windenergieanlage mit festen Rotationsgeschwindigkeiten (18 oder 27 Umdrehungen pro Minute) sind die hauptsächlichen Anregungsfrequenzen klar definiert:

- die Rotorumdrehungsfrequenz:  $f_{1p} = 0,30$  Hz oder  $0,45$  Hz („1p Anregung“),
- die Blattdurchgangsfrequenz:  $f_{3p} = 0,90$  Hz oder  $1,35$  Hz („3p Anregung“).

#### 4.5.1 Messdaten

Die Messungen des Turms (Tragwerk) der Windenergieanlage Tacke TW600 fanden im Herbst 2015 statt. Der Abstand des Profilschanners vom Turmsockel betrug dabei ca. 30 m. In Kombination mit der Nabenhöhe von ca. 50 m entstehen so maximale Messdistanzen von 60 m. Aufgrund der Windgeschwindigkeit wurde die Anlage mit einer Rotationsgeschwindigkeit von 27 Umdrehungen pro Minute betrieben.

Da eine Windenergieanlage größtenteils rotationssymmetrisch um die Stehachse konzipiert ist, sind die auftretenden Eigenformen bzw. Eigenfrequenzen theoretisch in allen Richtungen nahezu identisch. Zur Erfassung der Eigenfrequenzen kann somit die Beobachtungsrichtung prinzipiell frei gewählt werden. Abgesehen von den Amplituden der Eigenfrequenzen ist die Hauptbewegungsachse einer Windenergieanlage aufgrund der Verformung, die durch die Windlast induziert wird, jedoch in Windrichtung. Um die dadurch entstehenden Instationaritäten in den Messzeitreihen zu vermeiden, orientierte sich die Messkonfiguration an der Ausrichtung der Windenergieanlage und fand senkrecht zur Windrichtung statt, siehe **Abb. 133**.



**Abb. 133.:** Schematische Messkonfiguration für die Überwachung einer Windenergieanlage.

Da die Windenergieanlage einen glatten Stahlrohrturm besitzt, tritt keine Strukturierung im Messprofil auf. Somit sind alle drei räumlichen Prozessierungsmethoden nutzbar. Für dieses Beispiel kommt die Wavelet-Approximation zum Einsatz. Das approximierte Tragwerksprofil wird dabei in einem äquidistanten Raster von 0,5 m an 93 Positionen in einer Höhe zwischen 1 m und 47 m ausgewertet.

#### 4.5.2 Raumzeitliche Bestimmung der Horizontalverformung

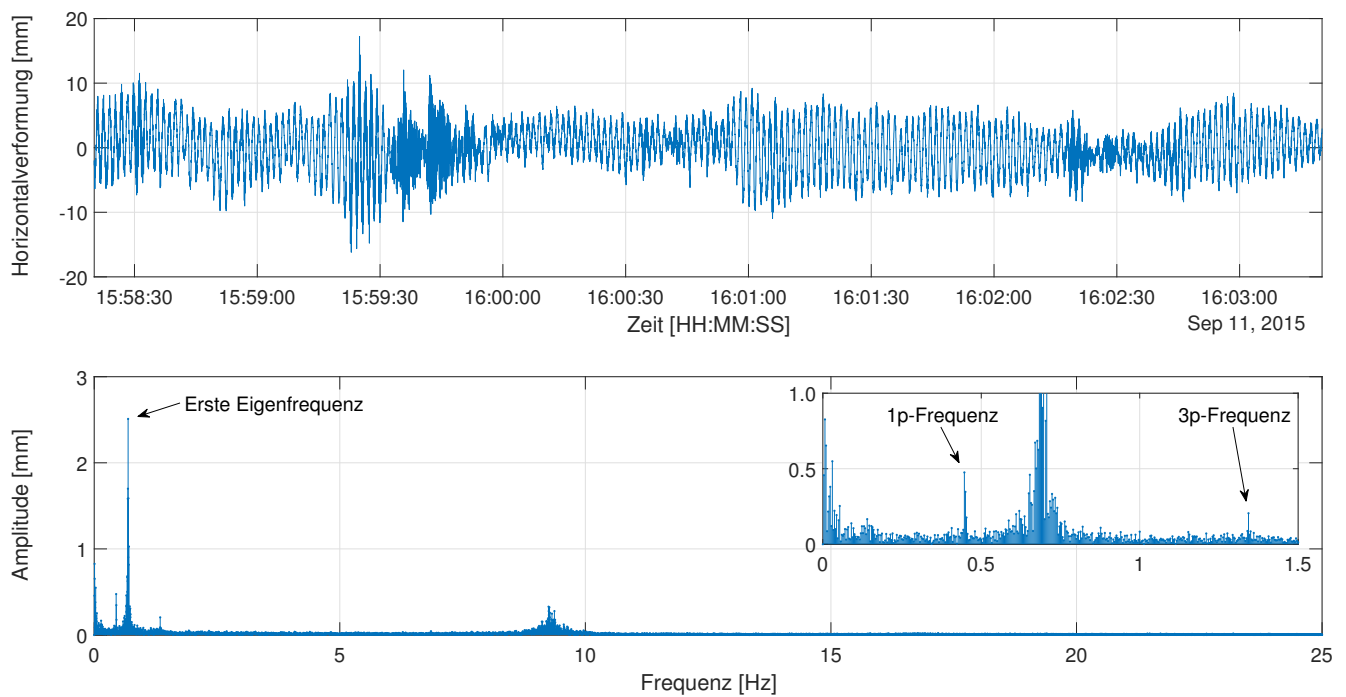
Im oberen Diagramm in **Abb. 134.a** ist eine 5-minütige Zeitreihe der y-Koordinate des approximierten Tragwerkspunktes in 47 m Höhe dargestellt. Im unteren Diagramm ist das entsprechende Amplitudenspektrum aufgetragen. Der Großteil der Energie konzentriert sich auf die beiden Bereiche bis 2 Hz und zwischen 9 und 10 Hz. In der rechten oberen Ecke ist der Ausschnitt von 0 bis 2 Hz noch einmal vergrößert dargestellt und beschriftet.

Obwohl die Messrichtung senkrecht zur Windrichtung gewählt wurde, sind noch Instationaritäten in der Zeitreihe vorhanden. Einerseits variiert der Mittelwert, andererseits aber auch die Amplitude der Zeitreihe.

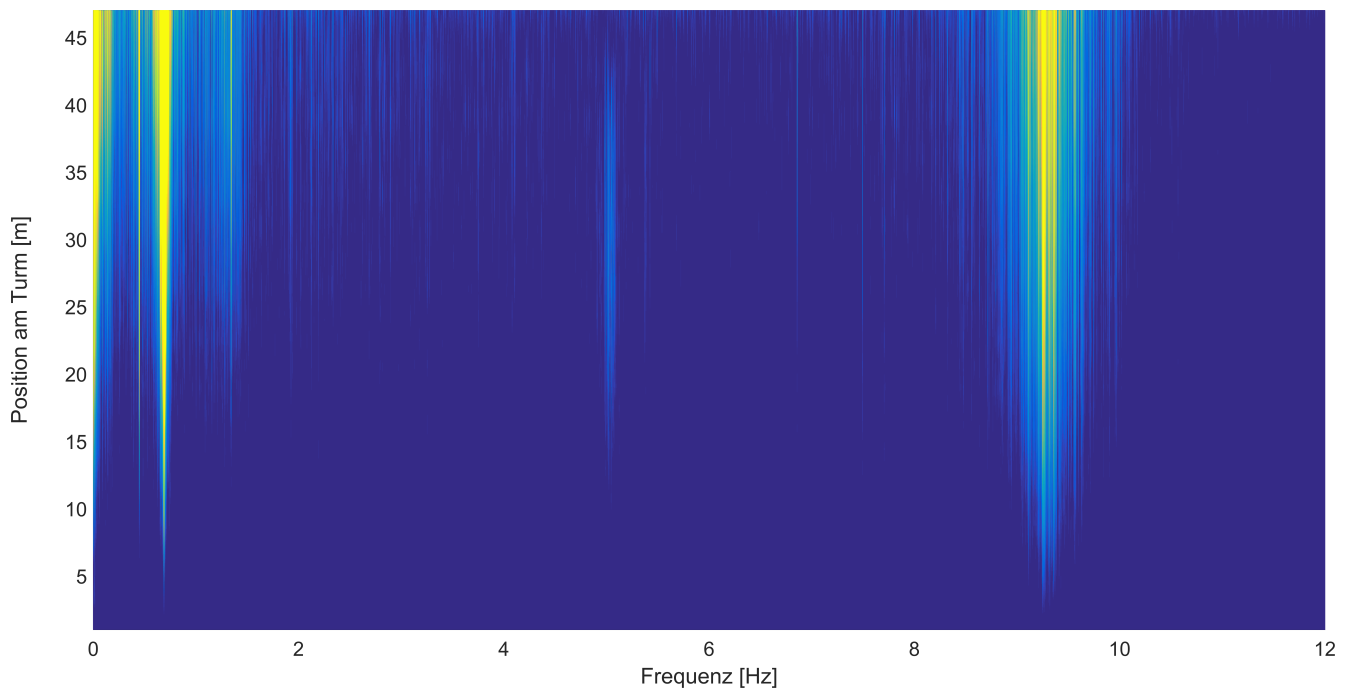
Die Mittelwertvariationen zeigen sich im Amplitudenspektrum in **Abb. 134.a** hauptsächlich im Bereich bis 0,2 Hz, da es sich um sehr langwellige Schwingungen handelt. Dieser Bereich entspricht dem Windspektrum aus **Abb. 132**.

Im weiteren Verlauf des Amplitudenspektrums (bis 2 Hz) sind außerdem die berechnete erste Eigenfrequenz mit 0,69 Hz sowie die 1p- und 3p-Frequenz mit 0,45 Hz bzw. 1,35 Hz erkennbar. Insbesondere in der Vergrößerung des Amplitudenspektrums lassen sich diese Frequenzen eindeutig identifizieren. Darüber hinaus treten in dem breiteren Frequenzband (zwischen 9 Hz und 10 Hz) ebenfalls Amplituden auf, die über dem Rauschniveau liegen.

Das approximierte Tragwerksprofil wird an 93 Positionen des Turms ausgewertet. Dementsprechend kann an allen Positionen das Amplitudenspektrum berechnet werden. In **Abb. 134.b** ist der gesamte Turm der Windenergieanlage im Frequenzbereich dargestellt, wobei aus Gründen der Übersichtlichkeit auf der x-Achse lediglich Frequenzen bis 12 Hz dargestellt sind. Die y-Achse entspricht der Höhe am Turm und die Amplituden sind farblich von blau (niedrig) zu gelb (hoch) skaliert.



**Abb. 134.a.:** oben: Zeitreihe der y-Koordinate des approximierten Tragwerkspunktes in 47 m Höhe; unten: entsprechendes Amplitudenspektrum.



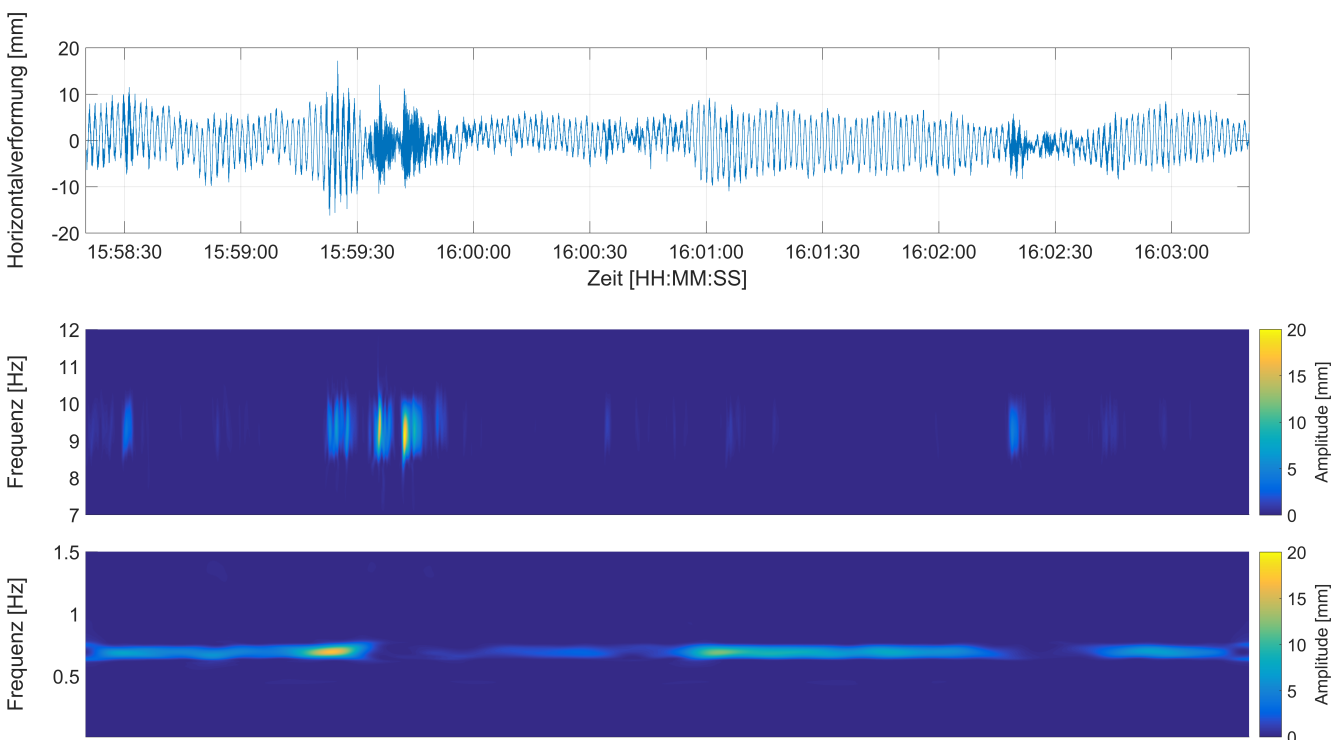
**Abb. 134.b.:** Amplitudenspektren aller 93 approximierten Positionen als Wasserfalldiagramm.

Die anhand **Abb. 134.a** thematisierten Frequenzbereiche lassen sich in **Abb. 134.b** über die gesamte Turmhöhe erkennen und weisen dabei eine von oben nach unten abnehmende Amplitude auf. Hervorzuheben ist, dass sich so nicht nur die erste Eigenfrequenz bestimmen lässt, sondern direkt die erste Eigenform der Windenergieanlage gemessen werden kann, siehe auch [SE16]. Dabei bietet die nahezu kontinuierliche Erfassung der Turmoberfläche die Möglichkeit, etwaige abweichende Frequenzmuster sehr genau zu lokalisieren, z. B. aufgrund der Ermüdung einzelner Turmsegmente.

Insgesamt gesehen macht der Vergleich der Amplitude der ersten Eigenfrequenz im Amplitudenspektrum mit der (variierenden) Amplitude der Zeitreihe deutlich, dass die berechneten 2,5 mm (siehe **Abb. 134.a**) nicht repräsentativ für die gesamte Zeitreihe sind, sondern vielmehr eine Art Mittelwert der Energie auf dieser Frequenz darstellen. Das gleiche gilt entsprechend auch für die anderen Frequenzen im Amplitudenspektrum.

Darüber hinaus zeigen sich zwei Zeitpunkte, an denen bereits im Zeitbereich in **Abb. 134.a** ein atypisches Verhalten erkennbar ist: der Bereich um 15:59:45 Uhr und kurz vor 16:02:30 Uhr. Hier scheint die ansonsten durchgehende Schwingung (erste Eigenfrequenz) komplett einzubrechen. Aufgrund dieser Instationaritäten besitzt das Amplitudenspektrum nur eine begrenzte Aussagekraft.

Um weitergehende Aussagen über das zeitliche Auftreten der einzelnen Frequenzen treffen zu können, wird im Folgenden zur CWT übergegangen, siehe **Abb. 135**.



**Abb. 135.:** Relevante Ausschnitte der CWT einer beispielhaften Zeitreihe in 47 m Höhe.

Im oberen Diagramm in **Abb. 135** ist exemplarisch für die gesamte Turmstruktur erneut die 5-minütige Zeitreihe der y-Koordinate des approximierten Tragwerkspunktes in einer Höhe von 47 m dargestellt. In den unteren beiden Diagrammen ist jeweils ein Frequenzausschnitt der CWT dieser Zeitreihe gezeigt. Auf der x-Achse ist die Zeit dargestellt, die y-Achse gibt die Frequenzinformation wieder und die entsprechenden Amplituden sind farbcodiert.

Der Vergleich der Zeitreihe im oberen Diagramm mit der Zeit-Frequenz-Darstellung im mittleren Diagramm ergibt eine exakte Übereinstimmung der auftretenden Energie im mittleren Diagramm (Frequenzbereich: 7 Hz bis 12 Hz) mit den Zeitpunkten der auffälligen Signalmuster. Bei diesen Effekten handelt es sich

---

somit um sehr begrenzt auftretende Erscheinungen, die jedoch eine deutlich größere Amplitude aufweisen als im Amplitudenspektrum dargestellt, vergleiche **Abb. 134.a**.

Des Weiteren lässt sich ein zeitlicher Zusammenhang zwischen dem Auftreten dieser Effekte und der Änderung der Amplitude des Signals, vornehmlich der ersten Eigenfrequenz erkennen. Aufgrund der ähnlichen Dauer der Abschnitte mit tendenziell ähnlichen Eigenschaften (Amplitude) könnte eine mögliche Ursache die Nachregelung der Gondel sein (siehe auch [RO17]), die in diesem Fall starke Vibrationen mit Amplituden von mehreren Millimetern in den Turm überträgt.



---

## 5 Fazit und Ausblick

---

Ingenieurbauwerke sind ein wichtiger Bestandteil der technischen Infrastruktur. Die Überwachung ihrer Tragfähigkeit bzw. Funktionstauglichkeit ist deshalb insbesondere bei sicherheitskritischen Bauwerken von großer Bedeutung. Da es sich bei diesen oft um schwingungsfähige Bauwerke handelt, steht die Erfassung von zeitlich variablen Tragwerksdeformationen, die durch die Einwirkung dynamischer Belastungen induziert werden, im Vordergrund.

Sowohl die Anzahl als auch der Umfang solcher Überwachungsaufgaben nimmt aufgrund der alternden Infrastruktur und einem vermehrten Neubau von Ingenieurbauwerken stetig zu. Dadurch ergeben sich bei deren Bewältigung vielfältige neue Herausforderungen. Zwei der wichtigsten Aufgaben sind eine effizientere Erfassung und eine verbesserte räumliche Auflösung von zeitlich variablen Tragwerksdeformationen. Der Wunsch nach einer räumlich verdichteten Erfassung resultiert dabei vor allem aus den folgenden Aspekten: Verbesserung der räumlichen Erfassung des Tragwerksverhaltens, Reduktion von bei der Planung benötigtem Vorwissen (siehe [Heu+13]), Aufdeckung von Unstetigkeitsstellen, wie Risse oder Brüche und die Bereitstellung von quantitativ und qualitativ verbesserten Inputs für realitätsnahe Simulationen.

An einem breiten Anwendungsspektrum konnte gezeigt werden, dass sich zeitlich variable Tragwerksdeformationen mit einem berührungslos messenden Profils Scanner effizienter und in einer wesentlich höheren räumlichen Auflösung erfassen lassen, als dies mit typischerweise für die Überwachung von Tragwerken verwendeter Sensorik möglich ist.

Die mit Profils Scannern ermöglichte hoch aufgelöste räumliche und zeitliche Erfassung führt jedoch unweigerlich zu großen Datenmengen. Für den praktischen Einsatz folgt daraus, dass diese automatisiert erfasste Information auch einer weitgehend automatisierten Auswertung und Qualitätsbewertung zu unterziehen ist. Um diese Anforderungen zu erfüllen, musste eine universell einsetzbare Konzeption für die Prozessierung der Messreihen entwickelt werden.

Insbesondere unter dem Aspekt der Automatisierung gilt es zu beachten, dass die zu prozessierenden Messreihen in der Regel durch Unstetigkeiten in ihrem räumlichen und zeitlichen Verlauf sowie einer wechselnden Charakteristik in ihrem Streuverhalten gekennzeichnet sind. Um diese Unstetigkeiten und die variablen statistischen Eigenschaften in den Messreihen zu identifizieren, müssen Verfahren eingesetzt werden, die ein duales Identifikationspotenzial im Zeit- bzw. Ortsbereich und Frequenzbereich besitzen, siehe auch [Neu08].

Für das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Konzept der sogenannten **raumzeitlichen Prozessierung** wurde deshalb die diskrete Wavelet-Transformation (DWT) eingesetzt. Mit der DWT wird die Analyse der Messreihen in der Orts-Frequenz- bzw. Zeit-Frequenz-Ebene durchgeführt und so die Lokalisierung und Charakterisierung von Unstetigkeitsstellen ermöglicht.

Ein weiterer wichtiger Aspekt der **raumzeitlichen Prozessierung** ist die Qualitätsbewertung der abgeleiteten Tragwerkspunkte in Form von Unsicherheiten. Dabei wird durch die kombinierte Auswertung der räumlichen und zeitlichen Messreihen die vorhandene redundante Information genutzt, um die approximierten Tragwerksprofile zu verifizieren und deren Unsicherheiten zu quantifizieren.

Der konkrete Ablauf einer solchen **raumzeitlichen Prozessierung** kann wie folgt beschrieben werden:

- Der **räumliche** Prozessierungsschritt unterteilt sich zunächst in drei Stufen. In der ersten Stufe werden automatisch Fehlmessungen erkannt und eliminiert. Der dafür eingesetzte Algorithmus basiert auf der diskreten Wavelet-Transformation und nutzt deren duales Identifikationspotenzial. Damit trägt dieser Schritt wesentlich zur Realisierung eines effizienten Auswerteprozesses bei.

---

Darauf aufbauend wird in der zweiten Stufe die Tragwerksstruktur durch die strukturorientierte Segmentierung der Tragwerksoberfläche interpretiert. Somit lässt sich einerseits die Komplexität der Messprofile reduzieren und andererseits gelingt eine Aufbereitung der Tragwerksoberfläche im strukturdynamischen Sinne, was eine differenzierte Interpretation des Bewegungsverhaltens einzelner Tragwerkselemente ermöglicht.

Die so korrigierten und segmentierten Messprofile werden in der dritten Stufe in Profile von reproduzierbaren Tragwerkspunkten überführt. Für diese sich an der Tragwerksoberfläche orientierende Parametrisierung werden je nach Komplexität der Tragwerksoberfläche unterschiedliche Approximationsverfahren eingesetzt, wie die räumliche Klassenbildung (Clustering), B-Splines oder die Wavelet-Approximation. Überdies können aus der Parametrisierung Werte für die Unsicherheiten der approximierten Tragwerkspunkte gewonnen werden.

- Der **zeitliche** Prozessierungsschritt beginnt mit der automatischen Erkennung und Eliminierung bzw. Korrektur von bis dato nicht identifizierten Fehlmessungen in den Zeitreihen der approximierten Tragwerkspunkte. Bei dem eingesetzten Algorithmus, der ebenfalls auf der DWT basiert, handelt es sich um eine abgewandelte Version des Analysealgorithmus aus der ersten Stufe. Darüber hinaus wird unter Ausnutzung der varianzanalytischen Eigenschaften der diskreten Wavelet-Transformation die Unsicherheitsbestimmung für die Zeitreihen von approximierten Tragwerkspunkten realisiert. Dieser Ansatz zur Unsicherheitsbestimmung kann insbesondere auch bei bewegten Tragwerkoberflächen eingesetzt werden. Mit den aus den Zeitreihen der approximierten Tragwerkspunkten gewonnenen Unsicherheiten lassen sich dabei auch die Ergebnisse der Unsicherheitsbestimmung der räumlichen Prozessierung verifizieren.

Das Endergebnis der **raumzeitlichen Prozessierung** sind Zeitreihen von Tragwerkspunkten, deren Approximationsgüte sich durch verifizierte Unsicherheiten beschreiben lässt. Damit konnte ein automatisierter Auswerteprozess für Profilsclannermessungen realisiert werden, der überdies eine projektbezogene in situ Qualitätsbewertung ermöglicht.

Da die abgeleiteten Tragwerksprofile nach der raumzeitlichen Prozessierung sowohl räumlich als auch in ihrer zeitlichen Abfolge nahezu kontinuierlich vorliegen, eignen sich diese u. a. für Analysen mit der kontinuierlichen Wavelet-Transformation. Aus diesen Analysen lassen sich die Eigenschwingungsgrößen (modale Parameter), wie Eigenformen, Eigenfrequenzen sowie Dämpfungskoeffizienten bestimmen. Durch einen Vergleich der so bestimmten Parameter mit den Ergebnissen aus strukturmechanischen Modellierungen können erste Hinweise bezüglich der Qualität bzw. Realitätsnähe dieser Modellierungen gewonnen werden.

Solche Betrachtungen könnten zugleich Ausgangspunkt für Analysen sein, die die gemessene Information mit strukturmechanischen Annahmen verknüpfen und als integrierte Analyse (siehe [Heu+13, S. 581 ff.] und [Lie07]) bzw. Messungs- und modellbasierte Strukturanalyse (MeMoS, siehe [NWW14]) bezeichnet werden. Dabei wird der Übergang vom bloßen Vergleich von simulierten und gemessenen Tragwerksverformungen zur Ableitung von Informationen für die Validierung der strukturmechanischen Modellierungen angestrebt:

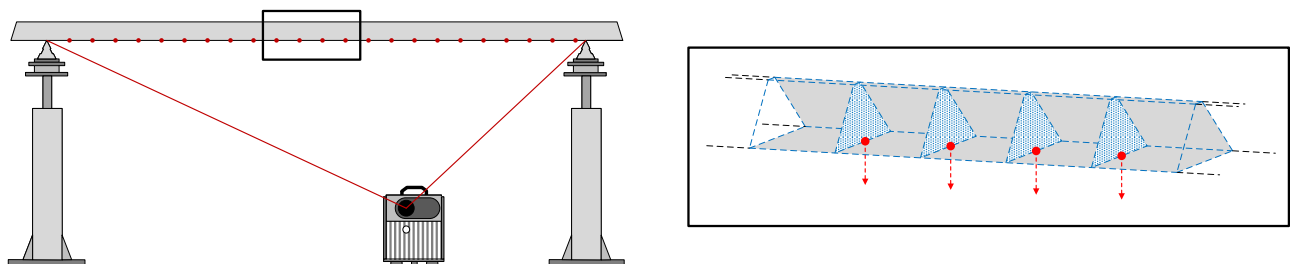
„Ziel [...] ist es, gestützt auf den verfügbaren, insbesondere gemessenen Informationen sämtliche Größen auf der Eingangs-, der Übertragungs- und der Ausgangsseite eines [...] Systems [...] zu schätzen.“ [Heu+13, S. 583]. Dazu wird im Rahmen der Systemtheorie die Kausalkette von gemessenen Eingangsgrößen (z. B. die Kraft der einwirkenden Belastung) mit strukturmechanischen Modellannahmen in Form einer Finiten-Elemente-Modellierung (FEM) und den gemessenen Ausgangsgrößen in einer gemeinsamen Parameterschätzung analysiert.

Ein Problem bei der Umsetzung solcher Analysen liegt jedoch oftmals in dem stark unterschiedlichen geometrischen Diskretisierungsgrad zwischen einer detaillierten strukturmechanischen Finite-Elemente-Modellierung und einer messtechnischen Erfassung der Tragwerksstruktur in wenigen Punkten. Da eine integrierte Analyse in der Regel über eine Parameterschätzung auf Basis eines Kalman-Filters realisiert wird, führt dies oft zu Konfigurationsdefekten, die sich nur über eine Modellvereinfachung kompensieren lassen. Eine solche Vereinfachung im Modellierungsgrad kann sich jedoch limitierend auf den Realitätsbezug des Tragwerksmodells auswirken.

Würden dagegen die aus Profilsclannermessungen abgeleiteten Tragwerksprofile als nahezu kontinuierlich vorliegende Biegelinien der Tragwerke interpretiert, so ließe sich diese Problematik verringern, da der Unterschied im geometrischen Diskretisierungsgrad zwischen Modellierung und Messung deutlich reduziert werden könnte.

Bei einfachen Tragwerksmodellen (wie Balken) könnten mit solchen kontinuierlich erfassten Biegelinien darüber hinaus Untersuchungen zur integrierten Analyse auf Basis von analytischen Modellierungen durchgeführt werden. Als Ergebnis dieser Untersuchungen besteht die Möglichkeit, den Vergleich von analytischen und numerischen Modellierungen durchzuführen, um so Aussagen zur Güte der Kalibrierung von strukturmechanischen Modellen zu erhalten.

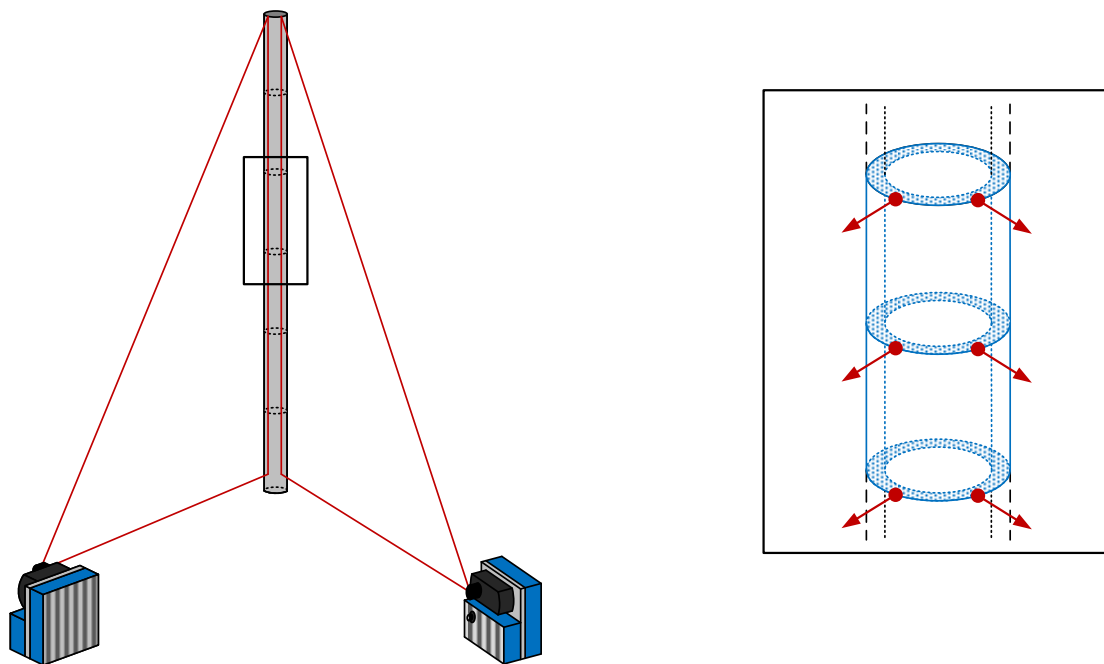
In **Abb. 139** ist auf der linken Seite veranschaulicht, wie der Versuchsaufbau für eine solche Untersuchung aussehen könnte. Die dargestellte Messkonfiguration orientiert sich an der Tragwerksüberwachung einer Brücke und zeigt die Erfassung der Biegelinie eines horizontalen, beidseitig gelagerten Balkens. Die rechte Seite von **Abb. 139** zeigt einen Ausschnitt des Balkens im Bereich der schwarzen Markierung. Darin sind in blau die diskretisierten „finiten“ Elemente und in rot die gemessenen Verformungsgrößen an den Knotenpositionen dargestellt. Damit soll verdeutlicht werden, dass für dieses Beispiel durch den Einsatz eines Profilsclanners die Anzahl der gemessenen Verformungsgrößen an die Anzahl der Freiheitsgrade im FE-Modell angepasst werden könnte.



**Abb. 139.:** links: Versuchsaufbau eines horizontalen Balkens; rechts: Kombination der numerischen Modellierung mit Messungen in homologen Punkten.

Ergänzend zu diesem Beispiel wird in **Abb. 140** ein erweiterter Versuchsaufbau betrachtet. Auf der linken Seite ist ein vertikaler, einseitig eingespannter Balken dargestellt, dessen Biegelinie durch zwei orthogonal zueinander stehende Profilsclanner im Raum erfasst wird. Die dargestellte Messkonfiguration orientiert sich dabei an der Tragwerksüberwachung einer Windenergieanlage, bei der einerseits die Bewegung in Windrichtung und andererseits die Bewegung in der Rotorebene von Interesse ist. Für eine möglichst realitätsnahe Beschreibung des Tragwerksverhaltens ist die simultane Erfassung aus zwei Aufnahmerrichtungen notwendig, was sich mit Profilsclannern, die über GPS-Empfänger synchronisiert werden, leicht realisieren ließe.

Auf der rechten Seite von **Abb. 140** ist der Biegebalken im Bereich der schwarzen Markierung dargestellt. Darin ist eine FE-Modellierung des Biegebalkens mit Zylindersegmenten skizzierte, deren translatorische Freiheitsgrade sich in zueinander orthogonalen Ebenen befinden. Durch die nahezu kontinuierliche Erfassung der Turmprofile könnte auch hier der Diskretisierungsgrad der Modellierung deutlich erhöht werden, ohne dass Konfigurationsdefekte auftreten würden. Dieser Vorteil könnte z. B. bei der Schadensdetektion und -lokalisierung an entsprechenden Tragwerksstrukturen genutzt werden.



**Abb. 140.:** links: Versuchsaufbau eines vertikalen Balkens; rechts: Kombination der numerischen Modellierung mit Messungen in homologen Punkten.

Anhand dieser einfachen Versuchsaufbauten wird das Potenzial von Profilsclannern zur Verifizierung des Strukturverhaltens von möglichst realitätsnahen Tragwerksmodellierungen veranschaulicht. Die skizzierten Beispiele bilden somit einen Ansatzpunkt für zukünftige Untersuchungen, die im Rahmen von integrierten Analysen bis zur Validierung von detaillierten Finite-Elemente-Modellierungen reichen können.

---

## Literatur

---

- [ADA13] ADAC. *Brücken der Bundesfernstraßen*. Techn. Ber. Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V., 2013.
- [Ahr10] Mark A. Ahrens. *Ein stochastisches Simulationskonzept zur Lebensdauerermittlung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken und seine Umsetzung an einer Referenzbrücke*. Diss. Ruhr-Universität Bochum, 2010.
- [AK13] Hamza Alkhatib und Hansjörg Kutterer. *Estimation of Measurement Uncertainty of kinematic TLS Observation Process by means of Monte-Carlo Methods*. In: *Journal of Applied Geodesy* 7.2 (Mai 2013), S. 125–134.
- [Aut18] Autorenkollektiv. *Belastungsversuche an der historischen Gewölbebrücke über die Aller bei Verden*. In: *Mauerwerkskalender* (2018).
- [Bän05] Werner Bäni. *Wavelets: Eine Einführung für Ingenieure*. Oldenbourg Verlag, 2005. ISBN: 9783486594003.
- [Bec+16] Matthias Becker, Birgit Traiser, Florian Schill, Jens Schneider und Andrei Firus. *Messung und Identifikation dynamischer Strukturparameter mittels terrestrischer Mikrowelleninterferometrie*. In: *Messen im Bauwesen* 2016. Nov. 2016.
- [Bec+14] Thomas Becker, Sven Weisbrich, Frieder Euteneuer, Cheng-Chieh Wu und Frank Neitzel. *Neue Möglichkeiten in der Bauwerksüberwachung durch integrierte Analyse von Sensormessungen und 3D-Bauwerksmodell*. In: *Gemeinsame Tagung 2014 der DGfK, der DGPF, der GfGI und des GiN (DGPF Tagungsband 23/2014)*. Hrsg. von Fernerkundung und Geoinformation e.V. Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie. März 2014.
- [BMV16] BMVI. *Bericht „Stand der Ertüchtigung von Straßenbrücken der Bundesfernstraßen“, Vorlage an den Ausschuss für Verkehr und digitale Infrastruktur des Deutschen Bundestages*. Techn. Ber. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur Abteilung Straßenbau, Referat StB 17, Nov. 2016.
- [BZ14] Christian Bucher und Volkmar Zabel. *Dynamische Modellbildung und Analyse von Tragwerken*. In: *Beton-Kalender 2008*. Wiley-VCH Verlag GmbH, 2014. Kap. 6, S. 53–112. ISBN: 9783433600702.
- [Bun17] Deutscher Bundestag. *Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Nicole Maisch, Matthias Gastel, Stephan Kühn (Dresden), weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN – Drucksache 18/12006 – Marode Eisenbahnbrücken in Hessen*. Drucksache 18/12236. Mai 2017.
- [BAN16] Johannes Bureick, Hamza Alkhatib und Ingo Neumann. *Robust Spatial Approximation of Laser Scanner Point Clouds by Means of Free-form Curve Approaches in Deformation Analysis*. In: *Journal of Applied Geodesy* 10.1 (Okt. 2016), S. 27–35.
- [Bur+16] Johannes Bureick, Hans Neuner, Corinna Harmening und Ingo Neumann. *Curve and Surface Approximation of 3D Point Clouds*. In: *AVN - Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 123.11-12 (Nov. 2016), S. 315–327.
- [BNL17] Mathias Burger, Frank Neitzel und Ralf Lichtenberger. *Einsatzpotential der digitalen Bildkorrelation zur Bauwerksüberwachung*. In: *Ingenieurvermessung 17, Beiträge zum 18. Internationalen Ingenieurvermessungskurs Graz*. Apr. 2017.
- [BWF17] Mathias Burger, Daniel Wujanz und Neitzel Frank. *Segmentierung von Punktwolken anhand von geometrischen und radiometrischen Informationen*. In: *Photogrammetrie - Laserscanning - Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2017*. Jan. 2017.

- 
- [Dau92] Ingrid Daubechies. *Ten Lectures on Wavelets*. Philadelphia, PA, USA: Society for Industrial und Applied Mathematics, 1992. ISBN: 9780898712742.
- [De 01] Carl De Boor. *A practical guide to splines*. Applied mathematical sciences. Berlin: Springer-Verlag, 2001. ISBN: 9780387953663.
- [DMK17] Krisztián Deák, Tamás Mankovits und Imre Kocsis. *Optimal Wavelet Selection for the Size Estimation of Manufacturing Defects of Tapered Roller Bearings with Vibration Measurement using Shannon Entropy Criteria*. In: *Journal of Mechanical Engineering* 63.1 (2017), S. 3–14.
- [DIN99] DIN1076. *Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen - Überwachung und Prüfung*. Norm. Nov. 1999.
- [DJ94] David L. Donoho und Iain M. Johnstone. *Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage*. In: *Biometrika* 81.3 (Sep. 1994), S. 425–455.
- [EL15] Matthias Ehrhart und Werner Lienhart. *Monitoring of Civil Engineering Structures using a State-of-the-art Image Assisted Total Station*. In: *Journal of Applied Geodesy* 9.3 (Sep. 2015), S. 174–182.
- [Eic05] Andreas Eichhorn. *Ein Beitrag zur Identifikation von dynamischen Strukturmodellen mit Methoden der adaptiven Kalman-Filterung*. Diss. Universität Stuttgart, 2005.
- [ETA17] ETA-Fabrik. *Internetauftritt ETA-Fabrik*. 2017. URL: <http://www.eta-fabrik.de/> (besucht am 25. 10. 2017).
- [FFS05] Peter Frohböse, Torsten Faber und Uwe Starossek. *Zur Regelung der Restnutzungsdauer von Windenergieanlagen*. In: *Stahlbau* 74.6 (Juni 2005), S. 392–398.
- [Frö14] Zoller + Fröhlich. *Technical Note: Z+F PROFILER® 9012, Integration, Interfaces, Method statement*. Techn. Ber. Z+F, 2014.
- [Frö17] Zoller + Fröhlich. *Z+F PROFILER® 9012 Datasheet*. 2017. URL: [http://www.zf-laser.com/fileadmin/editor/Datenblaetter/Z\\_F\\_PROFILER\\_9012\\_Datenblatt\\_D\\_final\\_kompr.pdf](http://www.zf-laser.com/fileadmin/editor/Datenblaetter/Z_F_PROFILER_9012_Datenblatt_D_final_kompr.pdf) (besucht am 25. 10. 2017).
- [Gor08] Bianca Gordon. *Zur Bestimmung von Messunsicherheiten terrestrischer Laserscanner*. Diss. Technische Universität Darmstadt, 2008.
- [HN16] Corinna Harmening und Hans Neuner. *Choosing the Optimal Number of B-spline Control Points (Part 1: Methodology and Approximation of Curves)*. In: *Journal of Applied Geodesy* 10.3 (Okt. 2016), S. 139–157.
- [Hen06] Maria Hennes. *Präzises und kinematisches Prüfen - Möglichkeiten der Präzisions-High-Speed-Linearmessbahn (PHIL) des Geodätischen Instituts der Universität Karlsruhe*. In: *ZfV - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement* 131.6 (Dez. 2006), S. 352–358.
- [Hes+06] Christian Hesse, Rainer Heer, Sebastian Horst und Hans Neuner. *A Concept for Monitoring Wind Energy Turbines with Geodetic Techniques*. In: *Proceedings of the 3rd IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering / 12th FIG Symposium on Deformation Measurements*. Mai 2006.
- [HNK05] Christian Hesse, Hans Neuner und Hansjörg Kutterer. *Statistical Analysis Of Kinematic Laser Scans*. In: *Proceedings of the 7th Conference on Optical 3-D Measurement Techniques*. Okt. 2005.
- [Heu+13] Otto Heunecke, Heiner Kuhlmann, Walter Welsch, Andreas Eichhorn und Hans Neuner. *Handbuch Ingenieurgeodäsie - Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen*. Springer-Verlag, 2013. ISBN: 9783879074679.
- [Hol+89] Matthias Holschneider, Richard Kronland-Martinet, Jean Morlet und Philippe Tchamitchian. *A Real-Time Algorithm for Signal Analysis with the Help of the Wavelet Transform*. In: *Wavelets, Time-Frequency Methods and Phase Space*. Bd. -1. Jan. 1989, S. 286. ISBN: 9783642759888.



- 
- [Hol+16] Christoph Holst, Hans Neuner, Andreas Wieser, Thomas Wunderlich und Heiner Kuhlmann. *Calibration of Terrestrial Laser Scanners*. In: *AVN - Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 123.6 (Juni 2016), S. 147–157.
- [IEC08] IEC. *Safety of laser products - Part 1: Equipment classification, requirements and user's guide*. International Electrotechnical Commission (IEC), Mai 2008.
- [ISO95] ISO. *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*. International Organization for Standardization, 1995. ISBN: 9789267101880.
- [JAS12] Zainul A. Jaffery, Khalil Ahmad und Pankaj Sharma. *Selection of Optimal Decomposition Level Based on Entropy for Speech Denoising Using Wavelet Packet*. In: *Journal of Bioinformatics and Intelligent Control* 1.2 (Dez. 2012), S. 196–202.
- [JPP15] Zivana Jakovljevic, Radovan Puzovic und Miroslav Pajic. *Recognition of Planar Segments in Point Cloud Based on Wavelet Transform*. In: *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 11.2 (Apr. 2015), S. 342–352.
- [JSH08] Rainer Joeckel, Manfred Stober und Wolfgang Huep. *Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung und ihre Integration in aktuelle Positionierungsverfahren*. Herbert Wichmann-Verlag, 11. Aug. 2008. ISBN: 9783879074433.
- [Kam+15] Rene Kamieth, Robert Liebich, Christoph Heilmann, Michael Melsheimer und Anke Grunwald. *Restnutzungsdauer-Ermittlung von Windenergieanlagen – Erste Erfahrungen aus einer temporären Lastmessung*. Techn. Ber. VDI, 2015.
- [Kau+17] Stephanie Kauker, Corinna Harmening, Hans Neuner und Volker Schwieger. *Modellierung und Auswirkung von Korrelationen bei der Schätzung von Deformationsparametern beim terrestrischen Laserscanning*. In: *Ingenieurvermessung 17, Beiträge zum 18. Internationalen Ingenieurvermessungskurs Graz*. Apr. 2017.
- [Kel04] Wolfgang Keller. *Wavelets in Geodesy and Geodynamics*. Walter de Gruyter, 2004. ISBN: 9783110198188.
- [Kut+10] Hansjörg Kutterer, Hamza Alkhatib, Jens-André Paffenholz und Harald Vennegeerts. *Monte-Carlo simulation of profile scans from kinematic TLS*. In: *Proceedings of the XXIV FIG Congress. Facing the Challenges-Building the Capacity*. Bd. 11. FIG. Apr. 2010, S. 2010.
- [KS04] Hansjörg Kutterer und Steffen Schön. *Alternativen bei der Modellierung der Unsicherheit beim Messen*. In: *ZfV - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement* 129.6 (Dez. 2004), S. 389–398.
- [Lac14] Stefan Lachmann. *Kontinuierliches Monitoring zur Schädigungsverfolgung an Tragstrukturen von Windenergieanlagen*. Diss. Ruhr-Universität Bochum, 2014.
- [Lee89] E.T.Y. Lee. *Choosing nodes in parametric curve interpolation*. In: *Computer Aided Design* 21.6 (Juli 1989), S. 363–370.
- [Lie+11] Jan P. Liebig, Jürgen Grünberg, Jens-André Paffenholz und Harald Vennegeerts. *Taktile und laserbasierte Messverfahren für die messtechnische Überwachung einer Autobahnbrücke*. In: *Bautechnik* 88.11 (Nov. 2011), S. 749–756.
- [Lie07] Werner Lienhart. *Challenges in the analysis of inhomogeneous structural monitoring data*. Diss. Technische Universität Graz, 2007.
- [LMR98] Alfred K. Louis, Peter Maaß und Andreas Rieder. *Wavelets*. Teubner Studienbücher: Mathematik. Vieweg+Teubner Verlag, 1998. ISBN: 9783519120940.
- [MGS16] Andreas Maier, Albrecht Gilka-Bötzow und Jens Schneider. *An energy-active facade element from mineralized foam (MF) and micro-reinforced, ultra-high-performance concrete (mrUHPC)*. In: *Journal of Facade Design and Engineering* 3.3-4 (Juni 2016), S. 289–301.

- 
- [MKS16] Andreas Maier, Jonas Kleuderlein und Jens Schneider. *Einfluss von Bauwerksverformungen auf Fassadenkonstruktionen aus Glas am Beispiel der ETA-Fabrik*. In: *Glasbau* 85.1 (Apr. 2016), S. 207–217.
- [Mai+17] Nicole Maisch, Matthias Gastel, Stephan Kühn, Tabea Rößner, Markus Tressel, Valerie Wilms und Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN. *Marode Eisenbahnbrücken in Hessen*. Drucksache 18/12006. Apr. 2017.
- [Mal89] Stéphane G. Mallat. *A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation*. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 11.7 (Juli 1989), S. 674–693.
- [MAA01] Sheila R. Messer, John Agzarian und Derek Abbott. *Optimal wavelet denoising for phonocardiograms*. In: *Microelectronics Journal* 32.12 (Dez. 2001), S. 931–941.
- [NN12] Frank Neitzel und Wolfgang Niemeier. *GBSAR, TLS und Beschleunigungsmessungen für Schwingungsuntersuchungen*. In: *Interdisziplinäre Messaufgaben im Bauwesen – Weimar 2012. Beiträge zum 115. DVW-Seminar am 25. und 26. September 2012 in Weimar*. 68. DVW-Arbeitskreis 4 »Ingenieurgeodäsie. Sep. 2012.
- [NWW14] Frank Neitzel, Sven Weisbrich und Cheng-Chieh Wu. *Integration der Finite-Elemente-Methode in die Ausgleichsrechnung zur Parameteridentifikation*. In: *Ingenieurvermessung 14, Beiträge zum 17. Internationalen Ingenieurvermessungskurs Zürich*. Apr. 2014.
- [Neu08] Hans Neuner. *Zur Modellierung und Analyse instationärer Deformationsprozesse*. Diss. Leibniz Universität Hannover, 2008.
- [NHK16] Hans Neuner, Christoph Holst und Heiner Kuhlmann. *Overview on current modelling strategies of point clouds for deformation analysis*. In: *AVN - Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 123.11-12 (Nov. 2016), S. 328–339.
- [NSN13] Hans Neuner, Claudius Schmitt und Ingo Neumann. *Modelling of terrestrial laser-scanning profile measurements with B-Splines*. In: *Proceedings of the 2nd Joint international Symposium on Deformation Monitoring*. Sep. 2013.
- [NSN14] Hans Neuner, Claudius Schmitt und Ingo Neumann. *Zur Bestimmung der verkehrsseitig verursachten Dehnung an einem Brückentragwerk mittels terrestrischem Laserscanning*. In: *Ingenieurvermessung 14, Beiträge zum 17. Internationalen Ingenieurvermessungskurs Zürich*. Apr. 2014.
- [PS17] Jens-André Paffenholz und Ulrich Stenz. *Integration von Lasertracking und Laserscanning zur optimalen Bestimmung von lastinduzierten Gewölbeverformungen*. In: *Ingenieurvermessung 17, Beiträge zum 18. Internationalen Ingenieurvermessungskurs Graz*. Apr. 2017.
- [PVK08] Jens-André Paffenholz, Harald Vennegeerts und Hansjörg Kutterer. *High frequency terrestrial laser scans for monitoring kinematic processes*. In: *INGEO 2008, 4th International Conference of Engineering Surveying*. Okt. 2008.
- [PW00] Donald B. Percival und Andrew T. Walden. *Wavelet Methods for Time Series Analysis*. Cambridge Series in Statistical and Probabilistic Mathematics. Cambridge University Press, 2000. ISBN: 9780521640688.
- [PT97] Les Piegl und Wayne Tiller. *The NURBS Book (2Nd Ed.)* New York, NY, USA: Springer-Verlag, 1997. ISBN: 9783540615453.
- [Qiu+06] Hai Qiu, Jay Lee, Jing Lin und Gang Yu. *Wavelet filter-based weak signature detection method and its application on rolling element bearing prognostics*. In: *Journal of Sound and Vibration* 289.4 (Feb. 2006), S. 1066–1090.
- [Res06] Yuriy Reshetyuk. *Investigation and calibration of pulsed time-of-flight terrestrial laser scanners*. Diss. Royal Institute of Technology (KTH) Stockholm, 2006.

- 
- [Röd11] Sabine Rödelisperger. *Real-time Processing of Ground Based Synthetic Aperture Radar (GB-SAR) Measurements*. Diss. Technische Universität Darmstadt, 2011.
- [RO17] Moritz Rodenhausen und Dragan Obradovic. *Strukturdämpfung von Hybrid-Türmen für Windenergieanlagen*. In: *Bautechnik* 94.10 (Okt. 2017), S. 710–716.
- [Sch+17] Gregor Schacht, Jens Piehler, Steffen Marx und Jens Müller. *Belastungsversuche an einer historischen Eisenbahn-Gewölbebrücke*. In: *Bautechnik* 94.2 (Feb. 2017), S. 125–130.
- [Sch17] Thomas Schäfer. *Berührungslose und flächenhafte Deformationsmessungen an Betonoberflächen unter besonderer Berücksichtigung der Interaktion zwischen Laserstrahl und Oberfläche*. Diss. Technische Universität München, 2017.
- [SE17] Florian Schill und Andreas Eichhorn. *Automatische Segmentierung von Profilsclannermessungen am Beispiel von Brückenbauwerken*. In: *Ingenieurvermessung 17, Beiträge zum 18. Internationalen Ingenieurvermessungskurs Graz*. Graz, Apr. 2017.
- [SE16] Florian Schill und Andreas Eichhorn. *Investigations of low- and high-frequency movements of wind power plants using a profile laser scanner*. In: *3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM)*. Vienna, Apr. 2016.
- [Sch01] Michael Schmidt. *Grundprinzipien der Wavelet-Analyse und Anwendungen in der Geodäsie*. Habilitation. Shaker Verlag, Jan. 2001. ISBN: 9783826588723.
- [SN15] Claudius Schmitt und Hans Neuner. *Knot estimation on B-Spline curves*. In: *Vermessung & Geoinformation* 103.2+3 (2015), S. 188–197.
- [SNN13] Claudius Schmitt, Hans Neuner und Ingo Neumann. *Strain detection on bridge constructions with kinematic laser scanning*. In: *Proceedings of the 2nd Joint international Symposium on Deformation Monitoring*. Sep. 2013.
- [Sch+13] Claudius Schmitt, Hans Neuner, Ingo Neumann, Christoph von der Haar, Michael Hansen und Steffen Marx. *Überwachung von Brückentragwerken mit ingenieurgeodätischen Verfahren und Sensoren der Baumesstechnik*. In: *GeoMonitoring 2013*. März 2013, S. 81–103.
- [Sch+14] Jens Schneider, Harald Garrecht, Andreas Maier und Albrecht Gilka-Bötzow. *Ein multifunktionales und energetisch aktives Fassadenelement aus Beton*. In: *Bautechnik* 91.3 (März 2014), S. 167–174.
- [She92] Mark J. Shensa. *The discrete wavelet transform: wedding the a trous and Mallat algorithms*. In: *IEEE Transactions on Signal Processing* 40.10 (Okt. 1992), S. 2464–2482.
- [ST06] Brij N. Singh und Arvind K. Tiwari. *Optimal Selection of Wavelet Basis Function Applied to ECG Signal Denoising*. In: *Digit. Signal Process.* 16.3 (Mai 2006), S. 275–287.
- [Sou+11] Sylvie Soudarissanane, Roderik Lindenbergh, Massimo Menenti und Peter Teunissen. *Scanning geometry: Influencing factor on the quality of terrestrial laser scanning points*. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 66.4 (Juli 2011), S. 389–399.
- [Str03] Gilbert Strang. *Lineare Algebra*. Springer-Verlag, 11. März 2003. ISBN: 9783540439493.
- [Sun+08] Tsung-Ying Sun, Chan-Cheng Liu, Shena-Ta Hsieh, Tsung-Ying Tsai und Jyun-Hong Jheng. *Optimal determination of wavelet threshold and decomposition level via heuristic learning for noise reduction*. In: *2008 IEEE Conference on Soft Computing in Industrial Applications*. Juni 2008, S. 405–410.
- [TLS10] Baoping Tang, Wenyi Liu und Tao Song. *Wind turbine fault diagnosis based on Morlet wavelet transformation and Wigner-Ville distribution*. In: *Renewable Energy* 35.12 (Dez. 2010), S. 2862–2866.
- [ubl17] u-blox.com. *LEA-6 u-blox 6 GPS Modules*. 2017. URL: [https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/LEA-6\\_DataSheet\\_%28UBX-14044797%29.pdf](https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/LEA-6_DataSheet_%28UBX-14044797%29.pdf) (besucht am 25. 10. 2017).
-

- 
- [Ven+10] Harald Vennegeerts, Eva Richter, Jens-André Paffenholz, Hansjörg Kutterer und Maria Hennes. *Genauigkeitsuntersuchungen zum kinematischen Einsatz terrestrischer Laserscanner*. In: *AVN - Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 117.4 (Apr. 2010), S. 140–147.
- [Wal04] Bernd H. Walser. *Development and calibration of an image assisted total station*. en. Diss. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2004.
- [Wan17] Johannes Wandinger. *Strukturdynamik*. 2017. URL: <http://wandinger.userweb.mwn.de/StruktDyn/index.html> (besucht am 25. 10. 2017).
- [Wuj16] Daniel Wujanz. *Terrestrial Laser Scanning for Geodetic Deformation Monitoring*. Diss. Technische Universität Berlin, 2016.
- [Wuj+17] Daniel Wujanz, Mathias Burger, Markus Mettenleiter und Frank Neitzel. *An intensity-based stochastic model for terrestrial laser scanners*. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 125.3 (März 2017), S. 146–155.
- [Wuj+18] Daniel Wujanz, Jens-André Paffenholz, Florian Schill, Mathias Burger, Ulrich Stenz, Ralf Lichtenberger, Frank Neitzel, Andreas Eichhorn und Ingo Neumann. *Terrestrisches Laserscanning für die Überwachung von Brücken bei Belastungsversuchen*. In: *Mauerwerkskalender* (2018).
- [Wun+16] Thomas Wunderlich, Wolfgang Niemeier, Daniel Wujanz, Christoph Holst, Frank Neitzel und Heiner Kuhlmann. *Areal Deformation Analysis from TLS Point Clouds - The Challenge*. In: *AVN - Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 123.11-12 (Nov. 2016), S. 340–351.
- [YA17] Mohd R. Yusof und Ahmad K. Ariffin. *Using Steins Unbiased Risk Estimate to Optimize Level of Decomposition in Stationary Wavelet Transform Denoising*. In: *ArXiv e-prints* (Jan. 2017).
- [ZN14] Miriam Zámečníková und Hans Neuner. *Der Einfluss des Auftreffwinkels auf die reflektorlose Distanzmessung*. In: *Terrestrisches Laserscanning 2014 (TLS 2014)*. Beiträge zum 139. DVW-Seminar am 11. und 12. Dezember 2014 in Fulda. 78. 2014.
- [ZN17] Miriam Zámečníková und Hans Neuner. *Untersuchung des gemeinsamen Einflusses des Auftreffwinkels und der Oberflächenrauheit auf die reflektorlose Distanzmessung beim Scanning*. In: *Ingenieurvermessung 17, Beiträge zum 18. Internationalen Ingenieurvermessungskurs Graz*. Apr. 2017.
- [Zám+14] Miriam Zámečníková, Andreas Wieser, Helmut Woschitz und Camillo Ressler. *Influence of surface reflectivity on reflectorless electronic distance measurement and terrestrial laser scanning*. In: *Journal of Applied Geodesy* 8.4 (Nov. 2014), S. 311–326.

---

## Abbildungsverzeichnis

---

8	Ansichten des Z+F Profiler 9012 aus [Frö14]. . . . .	8
9	Stativadapter mit und ohne Profilschanner sowie mit befestigten Prismen. . . . .	9
10.a	links: Profilschanner mit kippbarem Stativadapter; rechts: CAD-Modell gekippt, der Laser- messbereich ist in rot angedeutet. . . . .	10
10.b	Profilschanner mit adaptiertem Neigungssensor (Leica Nivel210) für beide Stativadapter. . . . .	10
11	Drehbare Anzielvorrückung. . . . .	11
12	Z+F Profiler 9012 mit ausgefahrener Referenzplatte. . . . .	12
13.a	Strahlradius $w$ mit definiertem Intensitätsabfall der gaußförmigen Verteilung. . . . .	13
13.b	Strahldivergenz $\Theta$ mit Strahltaile $w_0$ . . . . .	13
14	Laserstrahlradius $w$ vs. Entfernungsbereich $z$ . . . . .	14
15	Abnahme der Rotationsgeschwindigkeit direkt nach dem Erreichen der Messbereitschaft. . . . .	15
16.a	Variation der Rotationsgeschwindigkeit für ein unbewegtes Instrument. . . . .	16
16.b	Verschiedene relevante Zeitachsen des Messsystems mit auftretenden Ereignissen (PPS und Distanzmessung). . . . .	16
17	Theoretischer Sonderfall, bei dem aufgrund der PPS Unsicherheit die Zuordnung zu den Messpunkten variieren kann. . . . .	17
18	Mitgelieferte Steuerungssoftware ZFCtrl inklusive Live Vorschau der aktuellen Profilmessung. . . . .	18
20	Zwei- und dreidimensionale Überlagerung angrenzender Laserspots. . . . .	20
22	Z+F Profiler 9012 mit dem herstellerepezifischen Koordinatensystem. . . . .	22
23.a	Schematische Darstellung des Einflusses eines Encoderticksprungs auf ein Messprofil. . . . .	23
23.b	Zeitreihe der $z$ -Koordinate eines Profilmesspunktes innerhalb des in <b>Abb. 23.a</b> blau markierten Bereichs mit Unstetigkeiten aufgrund von Encoderticksprüngen. . . . .	23
28	Klassifikation des Messprozesses unter Berücksichtigung zufälliger und systematischer Messabweichungen. . . . .	28
35.a	Translation und Skalierung der Wavelet-Funktion. . . . .	35
35.b	Zeit-Frequenzebene mit konstanter relativer Frequenzauflösung. . . . .	35
36.a	Hoch- bzw. Tiefpassfilterung des Signals. . . . .	36
36.b	Rekursive Anwendung der Filterbank. . . . .	36
37	Messprofil eines Brückenhauptträgers. . . . .	37
38	Schematische Darstellung des Analysealgorithmus. . . . .	38
39	Messprofil mit lokalisierten Unstetigkeiten. Die Nummerierung der Unstetigkeiten folgt aus der Lokalisierungsphase. . . . .	39
41	Multiskalenanalyse des Messprofils. . . . .	41
42	Detaillierte Darstellung der Wavelet-Koeffizienten der Multiskalenanalyse aus <b>Abb. 41</b> . . . . .	42
45	Beträge der Wavelet-Koeffizienten mit universellem Schwellwert. . . . .	45
47	Zeilen 1 - 5: Entrauschte und über eine gleitende Summenbildung vorverarbeitete Betragskoeffizienten der Skalen 1 - 5; Zeile 6: Betragskoeffizientensumme. . . . .	47
48	oben: Betragskoeffizientensumme mit markierten lokalen Maxima; unten: Messprofil mit lokalisierten Unstetigkeiten. . . . .	48
51.a	Darstellung von links nach rechts: Sprung (Unstetigkeit 5), Spitze (Unstetigkeit 7), Kombination aus Sprung und Spitze (Unstetigkeit 18) und Fehlererkennung (Unstetigkeit 1). . . . .	51
51.b	Verlauf der Betragsmaxima über die Skalen. . . . .	51
53	Synthetische Referenzmuster des Typs Sprung, auf der linken Seite im Ortsbereich und auf der rechten Seite als Betragskoeffizientenverlauf im Frequenzbereich. . . . .	53



54	Synthetische Referenzmuster des Typs Spitze, auf der linken Seite im Ortsbereich und auf der rechten Seite als Betragskoeffizientenverlauf im Frequenzbereich. . . . .	54
55	Schätzung der Dimension für zwei beispielhafte Unstetigkeiten. . . . .	55
56	Messprofil eines Brückenhauptträgers mit markierten problematischen Unstetigkeiten. .	56
57	Bestimmung der Betragskoeffizientensumme ohne skalenabhängige Gewichtung (oben) und mit skalenabhängiger Gewichtung (unten). . . . .	57
58.a	Ergebnis der ersten Stufe (Eliminierung von Fehlmessungen). . . . .	58
58.b	Betragskoeffizientensumme oben: mit markierten Maxima nach der Methode aus [Bän05] bestimmt; unten: mit markierten Maxima, die größer sind als ihre Nachbarpunkte. . .	58
59	Ergebnis der zweiten Stufe (Segmentierung). . . . .	59
60	Automatische Analyse von Messprofilen. . . . .	60
62.a	Endergebnis der automatischen Analyse eines Messprofils mit farblich hervorgehobenen und beschrifteten Segmenten. . . . .	62
62.b	Profilmesspunkte innerhalb des Segmentes 2 inklusive des durch Mittelung erzeugten Klassenrepräsentanten. . . . .	62
63	oben: Räumliche Ausdehnung eines Profilausschnittes; unten: Standardabweichung des Mittelwertes bei zunehmender Klassenausdehnung (maximal 1 m). . . . .	63
65	B-Spline-Funktion (blau) mit markierten Knotenpunkten (grün), Kontrollpunkten (rot) und dem Kontrollpolygon (rot gestrichelt). . . . .	65
66	Schematischer Ablauf der Basis-Methode zur Berechnung von B-Splines. . . . .	66
68	Iterative Berechnung der Basis-Funktionen. . . . .	68
70	Approximation eines synthetischen Messprofils mit B-Splines. . . . .	70
71	Wavelet-Funktionen des Haar-Wavelets und eines Daubechies-Wavelets der Ordnung 8. .	71
73	Simuliertes Tragwerksprofil mit überlagertem gaußschen weißen Rauschen. . . . .	73
76	Zeitreihe der z-Koordinate eines approximierten Tragwerkspunktes während einer 8 Sekunden andauernden Zugüberfahrt. . . . .	76
78.a	Wavelet-Koeffizienten der ersten beiden Zerlegungsstufen. . . . .	78
78.b	Beträge der Wavelet-Koeffizienten aus <b>Abb. 78.a</b> mit universellem Schwellwert (in rot). .	78
79	oben: Betragskoeffizientensumme mit rot markierten Maxima; unten: Zeitreihe der z-Koordinate des approximierten Tragwerkspunktes mit rot markierten Unstetigkeiten. .	79
80	Median-Zeitreihe vor und nach der Korrektur der Encoderticksprünge. . . . .	80
81	Zeitreihen der Klassenrepräsentanten (arithmetisches Mittel und Median) mit Unstetigkeiten aufgrund von Encoderticksprünge und Fehlmessungen. . . . .	81
82	Zeitliche Prozessierung von Profilsclannermessungen. . . . .	82
83	oben: Mit gaußschem weißen Rauschen (Std.: 0,15 mm) überlagerte simulierte Zeitreihe einer Zugüberfahrt. unten: Entsprechende Wavelet-Koeffizienten der ersten Zerlegungsstufe. . . . .	83
84	Multiskalenanalyse der Zeitreihe. . . . .	84
85	Vergleich der Amplitudenspektren eines synthetisch erzeugten Beispiels (oben) und einer realen Messung (unten, Tragwerk in Ruhe). . . . .	85
86	Multiskalenanalyse der Zeitreihe, Darstellung entsprechend <b>Abb. 84</b> . . . . .	86
87	oben: Zeitreihe der z-Koordinate eines approximierten Tragwerkspunktes. unten: Zeitreihe der Standardabweichung des Mittelwertes der räumlichen Klasse. . . . .	87
89	Raumzeitliche Prozessierung von Profilsclannermessungen. . . . .	89
91	Einordnung der Beispiele zur Tragwerksüberwachung mit Profilsclannern in Orts- und Frequenzbereich. . . . .	91
92	Grundlegendes Auswerteschema der Profilsclannermessungen zur Überwachung von Tragwerken. . . . .	92
93.a	Seitenansicht der Einfeldträgerbrücke. . . . .	93



93.b	Schematischer Aufbau der Brückenhauptträger. . . . .	93
94.a	Unterseite des Brücke mit angebrachter Sensorik und dem Profils Scanner. . . . .	94
94.b	Schematischer Aufbau der Brücke quer zur Brückenachse. . . . .	94
95	Seitenansicht der Einfeldträgerbrücke mit eingezeichneten Messachsen. . . . .	95
96.a	Automatisch segmentiertes Messprofil in Längsrichtung am Hauptträger 1. . . . .	96
96.b	Automatisch segmentiertes Messprofil in Längsrichtung am Hauptträger 2. . . . .	96
97	Automatisch segmentiertes Profil in Querrichtung der Brücke auf Höhe der Referenzsensoren (Konfiguration 3). . . . .	97
98	Zeitreihen des Klassenrepräsentanten der türkisfarbenen Klasse, siehe <b>Abb. 96.a</b> . Zu beachten ist die abweichende y-Achsenkalierung des mittleren Diagramms. . . . .	98
99	Vergleich der Amplitudenspektren der Zeitreihenausschnitte für das Tragwerk in Ruhe und in Bewegung. . . . .	99
100	oben: Überlagerung der ursprünglichen Zeitreihe aus <b>Abb. 98</b> und der entauschten Zeitreihe. unten: Residuen zwischen diesen beiden Zeitreihen. . . . .	100
101.a	links: Befestigung der Verbindungsstange an der Brücke; rechts: Verankerung im Boden mit Gewicht und aufgesetztem Wegaufnehmer. . . . .	101
101.b	oben: Zeitreihen der Messung des induktiven Wegaufnehmers und der z-Koordinate des Klassenrepräsentanten während einer Zugüberfahrt. unten: Differenzen zwischen den beiden Zeitreihen. . . . .	101
102	Räumliche Klassenbildung in der Konfiguration 2. . . . .	102
103	oben: Zeitreihen der z-Koordinate der beiden Klassenrepräsentanten. unten: Zeitreihen der profilweise bestimmten Standardabweichung der Klassenrepräsentanten. . . . .	103
104	Raumzeitliche Darstellung einer Zugüberfahrt mit zwei Waggons. . . . .	104
106	Räumliche Klassenbildung in der Konfiguration 3. . . . .	106
107	Raumzeitliche Darstellung einer Zugüberfahrt mit einem Waggon. Die Darstellung entspricht <b>Abb. 104</b> . . . . .	107
109.a	Räumliche Klassenbildung auf Basis eines automatisch segmentierten Profils in Querrichtung auf Höhe der Referenzsensoren (Konfiguration 3). . . . .	109
109.b	Grundrissdarstellung der Brücke während einer Zugüberfahrt. Die Farbgebung der beiden Hauptträger (HT1 und HT2) entspricht den Zeitreihen aus <b>Abb. 110</b> . . . . .	109
110	Zeitreihen der Klassenrepräsentanten der blauen und orangefarbenen Klasse. . . . .	110
111.a	Ansicht der Westseite des untersuchten Bogens im Ursprungszustand. . . . .	111
111.b	Ansicht der Ostseite des Brückenbogens während des Belastungsversuches. Die Verankerung der Hydraulikzylinder ist rot markiert. . . . .	111
112	Mit den Hydraulikzylindern erzeugtes Belastungsregime. . . . .	112
113	Brückenbogen mit eingezeichneten Messachsen der beiden Konfigurationen. . . . .	113
114.a	Messprofil der Konfiguration 1 mit markierten Orientierungspunkten. . . . .	114
114.b	Ausschnitt des Messprofils für den Bereich der historischen Brücke inklusive markierter Positionen der CCR. . . . .	114
115.a	Ursprüngliche und entauschte Zeitreihen der z-Koordinate des approximierten Tragwerkspunktes im Bereich des CCR L10. . . . .	115
115.b	Zeitreihen der z-Koordinaten der approximierten Tragwerkspunkte. . . . .	115
116.a	Messprofil der Konfiguration 2 in einer um 26 Grad verkippten Ebene. . . . .	116
116.b	Kombinierte Darstellung von Messprofilen der Konfiguration 1 und 2. . . . .	116
117.a	Ursprüngliche und entauschte Zeitreihen der z-Koordinate des approximierten Tragwerkspunktes im Bereich des CCR L10 für die Konfiguration 1 und 2. . . . .	117
117.b	Ausschnitte der Lasteintragsphasen der Epochen 4 und 5. . . . .	117
118.a	Entauschte Ausschnitte der Lasteintragsphasen der Epochen 4 und 5. . . . .	118
118.b	Ausschnitte des Belastungsregimes der Epochen 4 und 5. . . . .	118
119.a	Innenansicht der ETA-Fabrik. . . . .	119

119.b	Standpunkt des Profilschanners mit Industriestativ. . . . .	119
120	Messprofil des gesamten Tragwerkprofils. . . . .	120
121.a	Temperaturverlauf während der gesamten Messkampagne. . . . .	121
121.b	Ausgewertete Bereiche des Messprofils an der Decke und den Wänden. . . . .	121
122	Epochendarstellung der raumzeitlichen Auswertung des Deckenbereiches. . . . .	122
123	Epochendarstellung der raumzeitlichen Auswertung der Wandbereiche. . . . .	123
124	Neue Trogbrücke über die Aller. . . . .	124
125.a	Räumliche Klassenbildung, B-Spline- und Wavelet-Approximation. . . . .	125
125.b	Zeitreihen der z-Koordinaten der drei Prozessierungsmethoden an der y-Koordinate -10,39 m. . . . .	125
126	Differenzen zwischen den Ergebnissen der drei Prozessierungsmethoden. . . . .	126
127	Trennung des quasistatischen vom dynamischen Verformungsanteil mittels Wavelet- Denoising. . . . .	127
128	Dynamischer Verformungsanteil im Zeit- und Frequenzbereich. . . . .	128
129	Dynamischer Verformungsanteil im Zeitbereich (linke Seite) und in der Zeit-Frequenz- Ebene (rechte Seite). Die Farbskalen der CWT sind unterschiedlich skaliert. . . . .	129
130	Amplitudenspektrum des dynamischen Verformungsanteils für das freie Ausschwingen des Brückenfeldes. . . . .	130
131	Windenergieanlage Tacke TW600. . . . .	131
132	Anregungsfrequenzen der Windenergieanlage Tacke TW600 mit möglichen Positionen für die erste Eigenfrequenz. . . . .	132
133	Schematische Messkonfiguration für die Überwachung einer Windenergieanlage. . . . .	133
134.a	oben: Zeitreihe der y-Koordinate des approximierten Tragwerkspunktes in 47 m Höhe; unten: entsprechendes Amplitudenspektrum. . . . .	134
134.b	Amplitudenspektren aller 93 approximierten Positionen als Wasserfalldiagramm. . . . .	134
135	Relevante Ausschnitte der CWT einer beispielhaften Zeitreihe in 47 m Höhe. . . . .	135
139	links: Versuchsaufbau eines horizontalen Balkens; rechts: Kombination der numerischen Modellierung mit Messungen in homologen Punkten. . . . .	139
140	links: Versuchsaufbau eines vertikalen Balkens; rechts: Kombination der numerischen Modellierung mit Messungen in homologen Punkten. . . . .	140
153	Klassifikation des Messprozesses unter Berücksichtigung zufälliger und systematischer Messabweichungen. . . . .	153
157.a	Skalierungsfunktion. . . . .	157
157.b	Haar-Wavelet. . . . .	157
158	Filtercharakteristik der Hoch- bzw. Tiefpassfilter im Orts- und Frequenzbereich. . . . .	158
159	Synthetisches Beispiel eines Sprungs mit entsprechenden Wavelet-Koeffizienten. . . . .	159
160	Synthetisches Beispiel einer Spitze mit entsprechenden Wavelet-Koeffizienten. . . . .	160
162	Projektion $p$ von $b$ auf eine Gerade. . . . .	162

---

## Tabellenverzeichnis

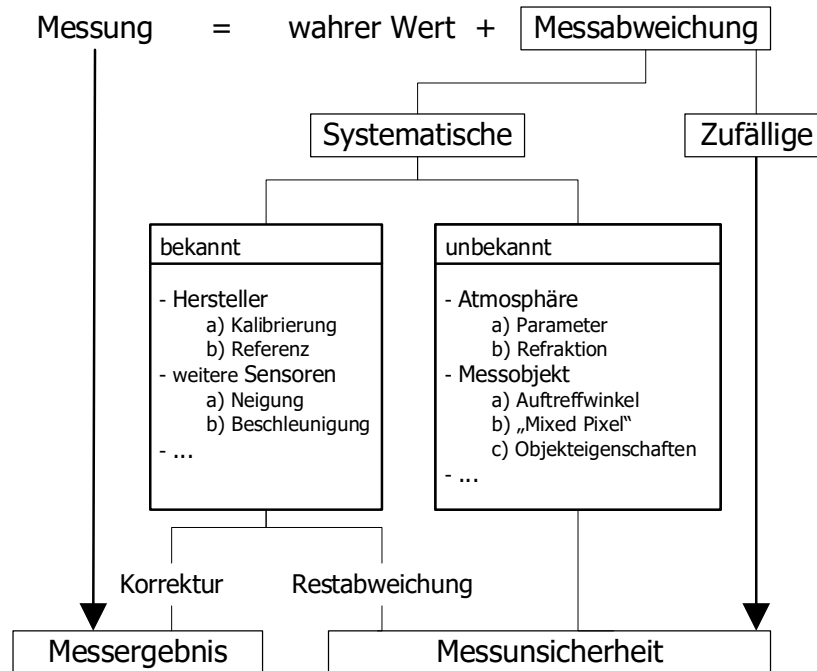
---

8	Ausgewählte Herstellerangaben für den Z+F Profiler 9012. . . . .	8
18	Relevante Ansteuerungsbefehle für den Z+F Profiler 9012. . . . .	18
20	Maximale Anzahl der Punkte pro Profil und Winkelinkremente für mögliche Kombinationen aus Lasermessrate und Rotationsgeschwindigkeit. . . . .	20
21	Übersicht der Laserspotdurchmesser, des Punktabstandes und der Überlagerung bei verschiedenen Lasermessgeschwindigkeiten und Distanzen zwischen Oberfläche und Instrument. . . . .	21
39	Auswahl von lokalisierten und analysierten Unstetigkeiten entsprechend <b>Abb. 39</b> . . . . .	39
64	Verschiedene Messszenarien mit entsprechenden Unsicherheiten aufgrund der sequenziellen Messung. . . . .	64
73	Residuenquadratsumme für unterschiedliche Kombinationen aus Zerlegungstiefe und Wavelet-Ordnung. . . . .	73
95	Durchgeführte Messkonfigurationen, siehe auch <b>Abb. 95</b> . . . . .	95
113	Durchgeführte Messkonfigurationen, siehe auch <b>Abb. 113</b> . . . . .	113



## A Anhang

### A.1 Systematische Messabweichungen beim Einsatz zur Überwachung von Tragwerken



**Abb. 153.:** Klassifikation des Messprozesses unter Berücksichtigung zufälliger und systematischer Messabweichungen.

Im Folgenden werden die in **Abb. 153** dargestellten systematischen Messabweichungen bezogen auf Profilsclannermessungen diskutiert. Zu den Rahmenbedingungen, unter denen typischerweise Messungen durchgeführt werden gehören:

- Eine kurze Messdauer, üblicherweise unter 30 Minuten.
- Eine aufgrund des Eindeutigkeitsintervalls maximale Messentfernung von 119 m, wobei diese in der Praxis meist deutlich darunter liegt.
- Einer der folgenden beiden Auswertansätze:
  1. Relative zeitliche Analyse  
Bei dieser Auswertemethode ist lediglich die relative Objektveränderung von Interesse. Einflussfaktoren, die konstante systemische Messabweichungen verursachen, können vernachlässigt werden. Änderungen der Auswirkung systematischer Messabweichungen wirken sich hingegen auf das Ergebnis aus.
  2. Relative räumliche Analyse  
Die ursprüngliche Form des Objektes ist von Interesse, nicht aber seine absolute Lage. Es müssen somit zusätzlich Einflussfaktoren berücksichtigt werden, deren Auswirkung je nach Beobachtungsrichtung einen anderen Wert annimmt. Somit können lediglich Einflussfaktoren vernachlässigt werden, deren Auswirkungen auch räumlich konstant sind.

---

## A.1.1 Bekannte Systematische Messabweichungen

---

Bei den bekannten systematischen Messabweichungen handelt es sich hauptsächlich um Instrumentenfehler, die eindeutig quantifiziert werden können und somit auch bei der Herstellerkalibrierung erfasst werden. Das Vorhandensein von Restabweichungen kann zwar nicht gänzlich ausgeschlossen werden, wird jedoch durch die zuvor erläuterten Auswertansätze weiter reduziert.

### **Additionskonstante**

Bei der reflektorlosen Streckenmessung tritt im Gegensatz zur Streckenmessung auf Reflektoren kein Offset bezüglich der Signalisierung des Zielpunktes auf. Da der Nullpunkt des Messsystems nicht mit dem Lasernullpunkt zusammenfällt, existiert jedoch eine geräteinterne Additionskonstante. Bei der Herstellerkalibrierung wird dieser Wert üblicherweise erfasst und gehört somit zu den bekannten systematischen Messabweichungen.

Verbleibende Restabweichungen werden sowohl bei der relativen zeitlichen als auch bei der relativen räumlichen Auswertemethode eliminiert, da sich dieser additive Term heraushebt und in allen Richtungen gleich auswirkt.

Im Falle einer entfernungsabhängigen Additionskonstante könnte diese Restabweichung bei der relativen räumlichen Auswertung relevant werden, wenn sich das Messobjekt über unterschiedliche Messdistanzen erstreckt. Bei der relativen zeitlichen Auswertung würden hingegen etwaige Auswirkungen aufgrund der sich wenig bewegenden Strukturen (Millimeter bis Zentimeter) dennoch entfallen.

### **Maßstabsfaktor**

Ein Maßstabsfaktor entsteht u. a. aufgrund von Temperaturvariationen des Quarzoszillators des Messlasers. Er wirkt sich somit auf alle Distanzmessungen unabhängig von ihrer Richtung gleich aus.

Da sämtliche Drifteffekte der Distanzmessungen kontinuierlich durch Messungen auf eine Referenzplatte korrigiert werden können, siehe Kapitel 2.1.2, spielt der Maßstabsfaktor bei einer maximalen Messdistanz von 119 m nur eine untergeordnete Rolle, siehe auch [Hol+16].

Der Einfluss verbleibender Restabweichungen wird durch beide Auswertansätze weiter verringert und kann deshalb vernachlässigt werden.

### **Indexabweichung**

Eine Indexabweichung liegt vor, wenn der Nullpunkt des Encoders nicht exakt mit der Nadirrichtung (siehe Definition Koordinatensystem 2.2.2) übereinstimmt. Im Rahmen der Herstellerkalibrierung wird diese Größe bestimmt und mit diesem Wert jede Messung korrigiert. Sie entspricht der Höhenindexabweichung bei einem Tachymeter. Etwaige Restabweichungen führen bei der Ausrichtung (Drehung) des Profilschanners um die x-Achse zu einem konstanten Winkelversatz. Da die absolute Lage der Messpunkte nicht von Interesse ist, hat eine Indexabweichung keine Auswirkung auf die Ergebnisse.

### **Zielachsabweichung**

Wird der Laserstrahl durch den Spiegel der Ablenkeinheit nicht exakt rechtwinklig abgelenkt, liegt eine Abweichung der Zielachse vor. Diese Größe wird ebenfalls bei der Herstellerkalibrierung bestimmt.

Durch den Übergang zu einem zweidimensionalen kartesischen Koordinatensystem (siehe Kapitel 2.2.2) ist die Zielachsabweichung für die weiteren Untersuchungen nicht relevant.

### **Standpunktstabilität**

Von systematischen Messabweichungen, die aufgrund einer mangelnden Standpunktstabilität resultieren, sind sämtliche Messgeräte betroffen, die eine stabile Basis benötigen. Die Erfassung der Standpunktstabilität kann entweder über externe Sensoren erfolgen, siehe z. B. Kapitel 2.1.1 oder über die Auswertung stabiler Bereiche innerhalb der Profile.



---

## A.1.2 Unbekannte systematische Messabweichungen

---

Die unbekannten systematischen Messabweichungen resultieren hauptsächlich aus Einflüssen der Atmosphäre bzw. vom Messobjekt selbst. Jedes Messobjekt bietet daher eine komplett neue Ausgangssituation, die sich nur schwer verallgemeinern lässt.

Für die Auswirkungen der Atmosphäre existieren Korrekturmodelle, die die tatsächliche Situation jedoch oft nur schlecht charakterisieren. Zusätzlich besteht das Problem, dass diese nur bis zu einer Wellenlänge von 1.300 nm Gültigkeit besitzen (siehe [JSH08]), die Wellenlänge des Messlasers jedoch 1.500 nm beträgt.

Für die Korrektur von Messwerten aufgrund atmosphärischer Refraktion können nur theoretische Ansätze verfolgt werden, die bei praktischen Anwendungen oft zu keiner Verbesserung der Ergebnisse führt.

### Atmosphärenabhängige Messabweichungen

**Ausbreitungsgeschwindigkeit:** Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Messlaserstrahls hängt u. a. von den meteorologischen Parametern Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchte ab. Basierend auf diesen Parametern kann die erste Geschwindigkeitskorrektur berechnet werden. Da deren Auswirkung distanzabhängig ist und die maximale Messdistanz des Z+F Profiler 9012 lediglich 119 m beträgt, ist die zu erwartende Messabweichung vernachlässigbar. Bei Verwendung von relativen Auswertansätzen müssen überdies lediglich die Änderungen der Atmosphärenparameter in Betracht gezogen werden. Dabei gilt: Je länger die Messdauer desto größer können solche Änderungen ausfallen. Da Messungen zur Überwachung von Tragwerken Messzeiten von 30 Minuten nur selten überschreiten, treten innerhalb dieses Zeitraumes üblicherweise keine signifikanten Änderungen auf. Effekte, die sich aufgrund der Atmosphärenparameter auf die Streckenmessung auswirken, können somit weitestgehend vernachlässigt werden.

**Atmosphärische Refraktion:** Der Messlaserstrahl durchquert insbesondere bei steilen Visuren unterschiedliche Luftschichten. Aufgrund der Lichtbrechung an diesen Luftschichten können Effekte auftreten, die die Winkelmessung verfälschen. Bei kurzen Entfernungen von maximal 119 m sind die auftretenden Auswirkungen jedoch gering. Aufgrund der relativen Auswertung und der kurzen Messdauer werden etwaige Effekte eliminiert bzw. zumindest deutlich reduziert, sodass Auswirkungen auf die Winkelmessung vernachlässigbar sind.

### Objektabhängige Messabweichungen

**Auftreffwinkel:** Bei Messabweichungen aufgrund der Sclangeometrie spielt hauptsächlich der Auftreffwinkel eine Rolle. Je flacher der Auftreffwinkel des Laserstrahls zur Oberfläche desto ungenauer ist die entstehende Schnittgeometrie, da der auf die Oberfläche projizierte Laserspot die Form einer Ellipse annimmt. Nach [Hol+16] entspricht die gemessene Distanz einer gewichteten Mittelung aller möglichen Distanzen zwischen Instrument und der Oberfläche im Bereich des Footprints des Laserstrahls. Dabei hängt das entsprechende Gewicht einer Messung von den lokalen Eigenschaften der Oberfläche ab. Wie in [Gor08] dargestellt, fällt dabei das Zentrum des Laserstrahls nicht zwingend mit dem Schwerpunkt der Strahlellipse zusammen.

Die darüber hinaus entstehende Vorformung der Wellenfront führt dazu, dass das reflektierte Signal von näher gelegenen Oberflächenanteilen dominiert wird. Untersuchungen dazu finden sich z. B. in [Sou+11] und [ZN14].

Eine systematische Verfälschung der Messwerte wird bei dem relativen zeitlichen Auswertansatz eliminiert, bei einer relativen räumlichen Auswertung kann dieser Effekt eine Rolle spielen.

---

**„Mixed Pixel“ an Kanten:** Trifft der Footprint des Laserstrahls an einer Kante auf Oberflächen, die sich in unterschiedlichen Distanzen befinden, entstehen sogenannte „Mixed Pixel“. Wie zuvor erläutert, wird die vom Instrument gemessene Distanz durch Mittelung aller möglichen Distanzen im Bereich des Footprints des Laserstrahls erzeugt. Je nachdem welcher prozentuale Anteil des Footprints auf welche Fläche trifft, wird der Mittelwert mehr von der einen oder der anderen Fläche beeinflusst. Durch diesen Effekt werden Kanten und Ecken „ausgerundet“.

Um eine Verfälschung des Messergebnisses zu verhindern, werden Punkte, die im Bereich von Kanten auftreten, eliminiert, siehe auch Abschnitt 3.1.2.

**Objekteigenschaften wie Reflektivität, Oberflächenrauheit und Eindringtiefe:** Die Objekteigenschaften müssen immer im Bezug zur Laserspotgröße und der Wellenlänge des Laserstrahls betrachtet werden. Bei Messungen zur Überwachung von Tragwerken, die relativ zeitlich ausgewertet werden, können unterschiedliche Oberflächen zwar zu unterschiedlichen Rauschniveaus führen, die Auswirkung von konstanten systematischen Verfälschungen (Offset aufgrund der Oberflächenfarbe, siehe z. B. [Zám+14]) entfallen jedoch.

Für den Fall, dass sich die Objekteigenschaften innerhalb der Messdauer verändern, könnte dies zu relevanten Verfälschungen insbesondere im Zusammenhang mit den auftretenden Verformungen führen, da sich dadurch die Ausrichtung der Oberfläche zum Messsystem verändern kann.

Eine etwaige Änderung der Ausrichtung wird aufgrund der Relation zwischen Objektveränderung aufgrund der Verformung des Messobjektes und dessen Ausdehnung nur sehr kleine Beträge annehmen.

Information über die Änderung der Oberflächeneigenschaften bezogen auf die Reflektivität können in diesem Fall die gemessenen Intensitätswerte liefern.

Bei der relativen räumlichen Auswertung können Objekteigenschaften, wie Reflektivität, Oberflächenrauheit und Eindringtiefe eine größere Rolle spielen. Besteht die zu messende Struktur aus unterschiedlichen Materialien, wirken sich die unterschiedlichen Objekteigenschaften an verschiedenen Stellen des Bauwerks unterschiedlich aus. Auch bei Strukturen aus einheitlichen Materialien kann der Auftreffwinkel in Kombination mit der Oberfläche zu relevanten Effekten führen.

### **Parallelversatz der Spiegelrotationsachse**

Trifft der Laserstrahl den Spiegel der Ablenkeinheit nicht exakt in der Drehachse, so handelt es sich um einen Parallelversatz (Offset). Dieser Fall kann sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung auftreten, siehe [Gor08]. Ein horizontaler Parallelversatz führt demnach in Abhängigkeit vom Drehwinkel des Spiegels zu einer Verschiebung des horizontalen Koordinatenursprungs. Für eine definierte Winkelposition ist die so entstehende Nullpunktverschiebung jedoch konstant.

Ein vertikaler Parallelversatz wirkt sich dagegen ähnlich wie eine Zielachsabweichung aus (bezogen auf die x-Koordinate) und ist ebenfalls abhängig vom Drehwinkel des Spiegels. Im Gegensatz zur Zielachsabweichung ist die Auswirkung auf die x-Koordinate nicht entfernungsabhängig, sondern hängt lediglich von der momentanen Ausrichtung des Spiegels ab. Da die x-Koordinate beim Einsatz zur Überwachung von Tragwerken nicht weiter verwendet wird, kann dieser Versatz ebenfalls vernachlässigt werden.

### **Winkelversatz der Spiegelrotationsachse**

Die Auswirkung der Verkipfung des Spiegels der Ablenkeinheit gegenüber der Laserstrahlachse wird als Winkelversatz bezeichnet. Dieser Fall kann ebenfalls sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung auftreten. Ein horizontaler Winkelversatz führt zu einem falschen Winkelwert in Profilrichtung und wirkt sich daher wie die zuvor erwähnte Indexabweichung aus.

Der vertikale Fall hat die gleiche Auswirkung wie eine Zielachsabweichung, siehe u. a. [Hol+16]. Bei der Bestimmung der Herstellerkalibrierung wird dieser Winkelversatz ermittelt und entsprechend korrigiert.

---

## A.2 Filterung mit dem Haar-Wavelet

---

Herleitung der Haar-Filterkoeffizienten basierend auf [Kel04]:

Die Skalierungsfunktion  $\varphi$  des Haar-Wavelets ist durch

$$\varphi(t) = \begin{cases} 1 & \text{für } 0 \leq t < 1 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (157.a)$$

gegeben, siehe **Abb. 157.a**. Basierend auf der Zwei-Skalen-Gleichung (Skalierungsgleichung)

$$\varphi(x) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} h_k \varphi(2x - k) \quad (157.b)$$

können die Skalierungskoeffizienten mit

$$\varphi_{1,k}(x) = \sqrt{2} \varphi(2x - k) = \sqrt{2} \begin{cases} 1 & \text{für } \frac{k}{2} \leq x < \frac{k+1}{2} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (157.c)$$

berechnet werden. Es gilt

$$\varphi(x) = \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \varphi_{1,0}(x) + \frac{1}{\sqrt{2}} \varphi_{1,1}(x) \right). \quad (157.d)$$

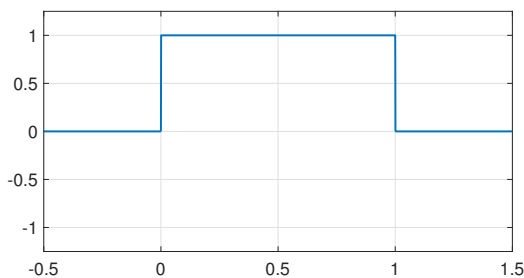
Dementsprechend ergeben sich die Koeffizienten des Tiefpassfilters (Skalierungskoeffizienten) zu

$$h_0 = h_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad \text{ansonsten } h_k = 0.$$

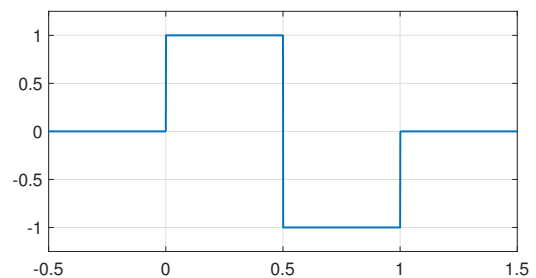
Damit ergibt sich das Haar-Wavelet zu

$$\psi(t) = (h_1 \varphi_{1,0}(x) - h_0 \varphi_{1,1}(x)) = \begin{cases} +1 & \text{für } 0 \leq t < \frac{1}{2} \\ -1 & \text{für } \frac{1}{2} \leq t < 1 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}, \quad (157.e)$$

siehe **Abb. 157.b**.



**Abb. 157.a.:** Skalierungsfunktion.



**Abb. 157.b.:** Haar-Wavelet.

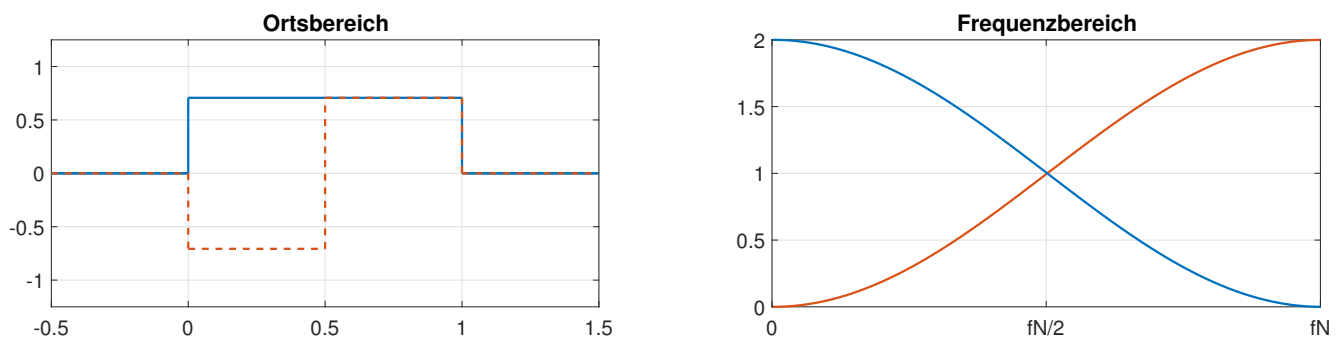
Da es sich bei der Haar-Basis um eine Orthonormalbasis handelt, gilt weiterhin

$$g_k = (-1)^{1-k} h_{1-k}. \quad (158)$$

Somit ergeben sich die Koeffizienten des Hochpassfilters (Wavelet-Filter) zu

$$g_0 = \frac{-1}{\sqrt{2}} \text{ und } g_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad \text{ansonsten } h_k = 0.$$

Die Filtercharakteristik als Hoch- bzw. Tiefpassfilter wird insbesondere im Frequenzbereich deutlich, siehe **Abb. 158**.



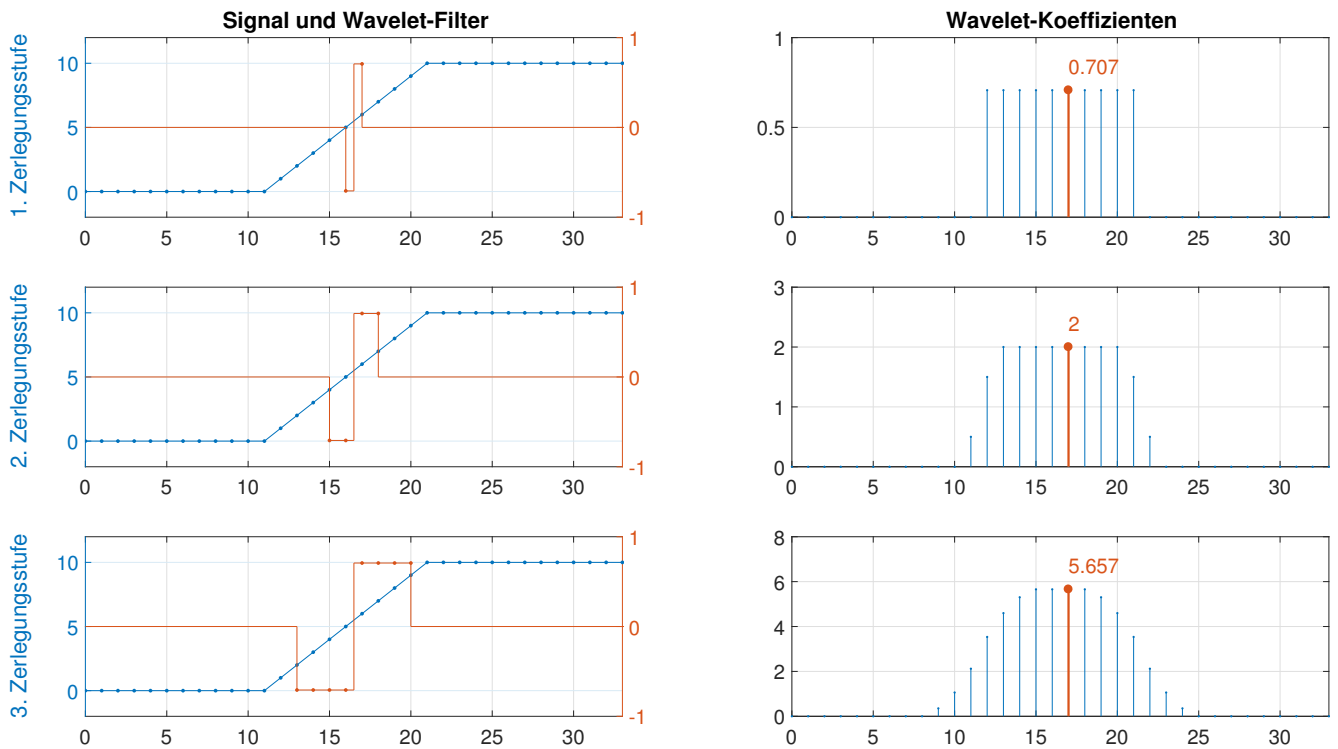
**Abb. 158.:** Filtercharakteristik der Hoch- bzw. Tiefpassfilter im Orts- und Frequenzbereich.

Für die Multiskalenanalyse im Rahmen der Implementierung nach [Hol+89] findet basierend auf den hergeleiteten Filterkoeffizienten der Skala  $m = 1$  für alle weiteren Skalen  $m > 1$  eine Filterspreizung statt. Zusätzlich wird eine Skalierung mit  $\frac{1}{2^{m-1}}$  durchgeführt.

Im Folgenden wird an zwei synthetischen Beispielen die Filterung mit dem Haar-Wavelet bis zur dritten Zerlegungsstufe demonstriert.

In **Abb. 159** ist auf der linken Seite jeweils das folgende Signal in blau dargestellt:  
Signal (Sprung) =  $[0 \cdots 0 \ 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8 \ 9 \ 10 \cdots 10]$ .

Zusätzlich ist eine exemplarische Position des Wavelet-Filters der entsprechenden Zerlegungsstufe in rot gezeigt. Auf der rechten Seite sind die berechneten Wavelet-Koeffizienten dargestellt, wobei der Wavelet-Koeffizient der links dargestellten Position in rot hervorgehoben und beschriftet wurde.



**Abb. 159.:** Synthetisches Beispiel eines Sprungs mit entsprechenden Wavelet-Koeffizienten.

### Berechnung der Wavelet-Koeffizienten

1. Zerlegungsstufe:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} -1 & 1 \end{bmatrix} (5 \ 6)^T = 0,707.$$

2. Zerlegungsstufe:

$$\frac{1}{\sqrt{4}} \begin{bmatrix} -1 & -1 & 1 & 1 \end{bmatrix} (4 \ 5 \ 6 \ 7)^T = 2.$$

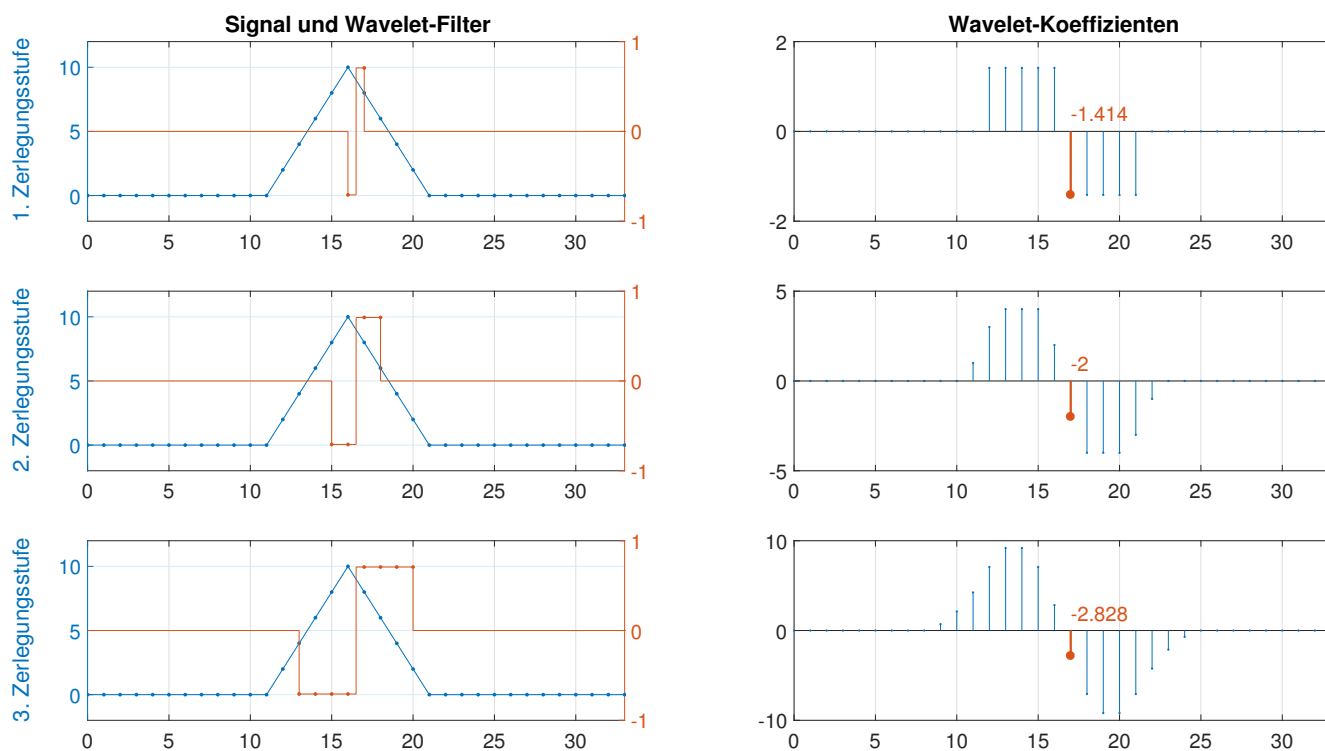
3. Zerlegungsstufe:

$$\frac{1}{\sqrt{8}} \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} (2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8 \ 9)^T = 5,657.$$

In **Abb. 160** ist auf der linken Seite jeweils das folgende Signal in blau dargestellt:

Signal (Spitze) =  $[0 \ \cdots \ 0 \ 2 \ 4 \ 6 \ 8 \ 10 \ 8 \ 6 \ 4 \ 2 \ 0 \ \cdots \ 0]$ .

Zusätzlich ist eine exemplarische Position des Wavelet-Filters der entsprechenden Zerlegungsstufe in rot gezeigt. Auf der rechten Seite sind die berechneten Wavelet-Koeffizienten dargestellt, wobei der Wavelet-Koeffizient der links dargestellten Position in rot hervorgehoben und beschriftet wurde.



**Abb. 160.:** Synthetisches Beispiel einer Spitze mit entsprechenden Wavelet-Koeffizienten.

### Berechnung der Wavelet-Koeffizienten

1. Zerlegungsstufe:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 10 & 8 \end{pmatrix}^T = -1,414.$$

2. Zerlegungsstufe:

$$\frac{1}{\sqrt{4}} \begin{bmatrix} -1 & -1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 8 & 10 & 8 & 6 \end{pmatrix}^T = -2.$$

3. Zerlegungsstufe:

$$\frac{1}{\sqrt{8}} \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 4 & 6 & 8 & 10 & 8 & 6 & 4 & 2 \end{pmatrix}^T = -2,828.$$



---

### A.3 Bestimmung lokaler Maxima

---

Die im Folgenden dargestellte Methode zur Bestimmung lokaler Maxima orientiert sich an den Ausführungen in [Bän05]:

Zur Bestimmung der lokalen Maxima wird der Vektor  $x$  jeweils um einen Wert nach links und rechts symmetrisch gegeneinander verschoben, bis die vorgegebene Umgebungsgrenze  $r$  erreicht ist. Somit entstehen  $2 \cdot r$  neue Zeilen für eine Matrix, die in der mittleren Zeile die Messreihe  $x$  enthält und oberhalb bzw. unterhalb nach rechts bzw. links verschobene Varianten von  $x$ .

Durch den Vergleich der Spaltenmaxima mit den Werten von  $x$  wird das lokale Maximum bezüglich einer Umgebung  $(-r, +r)$  ermittelt.

Das Prinzip soll im Folgenden an einer beispielhaften Messreihe  $x$  verdeutlicht werden:

$$x = \begin{bmatrix} 2 & 4 & 6 & 8 & 10 & 7 & 7 & 9 & 3 & 1 \end{bmatrix}.$$

Für  $r = 1$  ergibt sich  $xxx = [-\text{Inf}, x(1,1:\text{end}-1); x; x(\text{end},2:\text{end}), -\text{Inf}]$ :

$$xxx = \begin{bmatrix} -\text{Inf} & 2 & 4 & 6 & 8 & 10 & 7 & 7 & 9 & 3 \\ 2 & 4 & 6 & 8 & 10 & 7 & 7 & 9 & 3 & 1 \\ 4 & 6 & 8 & 10 & 7 & 7 & 9 & 3 & 1 & -\text{Inf} \end{bmatrix}.$$

Für  $r = 2$  ergibt sich entsprechend:

$$xxx = \begin{bmatrix} -\text{Inf} & -\text{Inf} & 2 & 4 & 6 & 8 & 10 & 7 & 7 & 9 \\ -\text{Inf} & 2 & 4 & 6 & 8 & 10 & 7 & 7 & 9 & 3 \\ 2 & 4 & 6 & 8 & 10 & 7 & 7 & 9 & 3 & 1 \\ 4 & 6 & 8 & 10 & 7 & 7 & 9 & 3 & 1 & -\text{Inf} \\ 6 & 8 & 10 & 7 & 7 & 9 & 3 & 1 & -\text{Inf} & -\text{Inf} \end{bmatrix}.$$

Durch die Bestimmung der Spaltenmaxima ergibt sich:

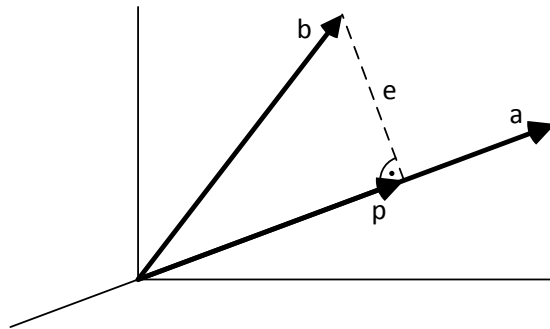
$$yyy = \begin{bmatrix} 6 & 8 & 10 & 10 & 10 & 10 & 10 & 9 & 9 & 9 \end{bmatrix}.$$

Mit der Position des mittleren Maximalwertes ist das lokale Maximum bezogen auf eine Umgebung  $(-r, +r)$  gefunden.

---

## A.4 Regressionsanalyse

---



**Abb. 162.:** Projektion  $p$  von  $b$  auf eine Gerade.

Gegeben sei der Punkt  $b$  und eine Gerade durch den Ursprung in Richtung des Vektors  $a$ , siehe **Abb. 162.** Gesucht wird der Punkt  $p$ , der  $b$  am nächsten liegt. Die Gerade  $e$  steht senkrecht auf dem Vektor  $a$ . Die Projektion

$$p = \lambda \cdot a \quad (162.a)$$

ist ein Vielfaches von  $a$  und entspricht der Bestimmung eines Skalierungsfaktors  $\lambda$ . Mit

$$e = b - p = b - \lambda a \quad (162.b)$$

folgt

$$a \cdot e = a \cdot (b - \lambda a), \quad (162.c)$$

durch ausmultiplizieren und umstellen ergibt sich

$$\lambda = \frac{a \cdot b}{a \cdot a} = \frac{a^T b}{a^T a} \quad (162.d)$$

und somit

$$p = \lambda a = \frac{a^T b}{a^T a} a. \quad (162.e)$$

$$(162.f)$$

Die geometrische Operation Orthogonalprojektion kann somit auf die Vektoroperation Skalarproduktbildung und die algebraische Operation „Lösung eines linearen Gleichungssystems“ zurückgeführt werden, siehe [Str03].

Dabei entspricht

$$s_\lambda = \frac{1}{a^T a} \quad (162.g)$$

---

der Genauigkeit der Schätzung. Für die Regressionsanalyse im Rahmen der automatischen Analyse von Messprofilen wird somit der folgende Zusammenhang gesucht:

$$\min \{ ||y - \lambda a_i|| \mid i = 1, \dots, n \}, \quad (163.a)$$

wobei mit dem Index  $i$  direkt auf die Breite der Unstetigkeiten geschlossen werden kann. Wenn außerdem die Höhe  $H_{ref}$  bzw. die Fläche  $F_{ref}$  der Referenzmuster jeweils mit 1 gewählt wird, entspricht  $\lambda$  direkt der geschätzten Höhe  $H_{sig}$  bzw. der geschätzten Fläche  $F_{sig}$ . Bei Spitzen ist die Höhe  $H$  durch den Zusammenhang

$$H \approx \frac{0.4 \cdot F}{\beta} \quad (163.b)$$

gegeben.



---

## Lebenslauf

---

Florian Johannes Schill

Geboren am 12. Dezember 1984 in Schwäbisch Hall

### Berufliche Tätigkeit:

2012 – 2018    Wissenschaftlicher Mitarbeiter  
am Institut für Geodäsie der Technischen Universität Darmstadt,  
Fachgebiet Geodätische Messsysteme und Sensorik

seit 2018      Wissenschaftlicher Mitarbeiter (Post-Doc)  
am Institut für Geodäsie der Technischen Universität Darmstadt,  
Fachgebiet Geodätische Messsysteme und Sensorik

### Universitätsausbildung:

2005 – 2011    Studium am Karlsruher Institut für Technologie (KIT),  
Geodätisches Institut (GIK),  
Diplomstudiengang Geodäsie und Geoinformatik

2011            Abschluss als Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing.)

### Schulausbildung:

1995 – 2004    Erasmus Widmann Gymnasium, Schwäbisch Hall